

Rada Čahtarević

**KOMPLEKSNI
DINAMIČKI
GEOMETRIJSKI
PROSTORNI
KONCEPTI
U ARHITEKTURI**

Rada Čahtarević

KOMPLEKSNI DINAMIČKI
GEOMETRIJSKI PROSTORNI KONCEPTI
U ARHITEKTURI

Arhitektonski fakultet Univerziteta u Sarajevu
Sarajevo, 2020.

Rada Čahtarević

KOMPLEKSNI DINAMIČKI GEOMETRIJSKI PROSTORNI KONCEPTI U ARHITEKTURI

Arhitektonski fakultet Univerziteta u Sarajevu, Sarajevo, 2020.

Izdavač: Arhitektonski fakultet Univerziteta u Sarajevu

Za izdavača: Prof. dr. Erdin Salihović

Naslov:

KOMPLEKSNI DINAMIČKI GEOMETRIJSKI PROSTORNI KONCEPTI U ARHITEKTURI

Autor:

Prof. dr. Rada Čahtarević

Recenzenti:

Prof. dr. Birgul Colakoglu

Prof. dr. Adnan Pašić

Prof. dr. Jasenka Čakarić

DTP i tehnička obrada: Rada Čahtarević

Elektronsko izdanje

CIP - Katalogizacija u publikaciji
Nacionalna i univerzitetska biblioteka
Bosne i Hercegovine, Sarajevo

72:514(075.8)
72:004.925(075.8)

ČAHTAREVIĆ, Rada

Kompleksni dinamički geometrijski prostorni koncepti u arhitekturi [Elektronski izvor] / Rada Čahtarević. - El. knjiga. - Sarajevo : Arhitektonski fakultet, 2020

Način pristupa (URL): https://af.unsa.ba/publikacije/Rada_Cahtarevic_Kompleksni_dinamicki_geometrijski_prostorni_koncepti_u_arhitekturi_2020.pdf. - Nasl. sa nasl. ekrana. - Opis izvora dana 3. 12. 2020. - Summary.

ISBN 978-9958-691-95-9

COBISS.BH-ID 41564678

SADRŽAJ

Predgovor	1
UVOD	3
1. PROSTORNA KONCEPTUALIZACIJA I APSTRAKCIJA	5
1.1. MATERIJALNI I ORGANSKI PROSTOR	7
1.1.1. Prostor savremenih fizikalnih koncepcija	8
1.1.2. Prirodni organski prostor	10
1.2. OPAŽAJNI, VIZUALNI I INFORMACIJSKI PROSTOR	12
1.3. APSTRAKCIJA PROSTORA	16
1.4. GEOMETRIJSKI PROSTOR	19
1.4.1. Euklidska geometrija	20
1.4.2. Razvoj geometrije kao apstraktnog prostornog modela	22
1.4.3. Primjenjena geometrija i sintetičko modeliranje prostora	26
2. GEOMETRIJSKI PROSTORNI KONCEPTI	29
2.1. GEOMETRIJSKE FORME, FIGURE I TIJELA	31
2.2. GEOMETRIJSKE MJERE, OMJERI I PROPORCIJE	36
2.2.1. Geometrijski merni sistemi	37
2.2.2. Omjer i proporcija	41
2.2.3. Specifični proporcionalni odnosi	43
2.2.4. Iracionalne veličine i zlatni rez	45
3. DINAMIČKI GEOMETRIJSKI KONCEPTI	51
3.1. STATIČNI I DINAMIČKI ASPEKTI GEOMETRIJE	52
3.1.1. Dinamički aspekti geometrije	54
3.2. GEOMETRIJSKE TRANSFORMACIJE	59
3.2.1. Transformacije podudarnosti	62
3.2.2. Transformacije sličnosti	67

3.2.3. Afine transformacije	70
3.2.4. Projektivne transformacije	72
3.3. NEEUKLIDSKE GEOMETRIJE	75
3.3.1. Eliptička i hiperbolička geometrija	77
3.4. TOPOLOGIJA	80
3.4.1. Topološke transformacije	82
3.5. KONCEPT SIMETRIJE	85
3.5.1. Teorija grupa i ornamentalna simetrija	90
3.5.2. Simetrija geometrijskih figura	95
3.5.3. Simetrične teselacije ravni	97
3.5.4. Simetrija geometrijskih tijela	99
3.5.5. Simetrija neizometrijskih i neeuklidskih prostora	102
4. KOMPLEKSNI DINAMIČKI PROSTORNI KONCEPTI I MODELI	104
4.1. SAVREMENI KONCEPTI PROSTORA	105
4.1.1. Rušenje klasičnog mehaničko-redukcionističkog naučnog modela	106
4.1.2. Organski prostorni koncepti	108
4.1.3. Vizualno opažanje prostora i ekološka teorija percepcije	111
4.2. KOMPLEKSNI DINAMIČKI SISTEMI	117
4.2.1. Haotični procesi i nelinearni dinamički sistemi	119
4.2.2. Kompleksni dinamički adaptabilni sistemi	126
4.3. GEOMETRIJSKO MODELIRANJE KOMPLEKSNIH DINAMIČKIH SISTEMA	130
4.3.1. Fraktalna geometrija	134
4.3.2. Samoslične transformacije i fraktalna simetrija	141
4.3.3. Fraktalna dimenzija i skalirajući sistem geometrijske mjere	144
4.3.4. Izomorfnost prirodnih i fraktalnih geometrijskih formi	151
4.3.5. L - sistemi	154
4.3.6. Kompjutacijsko modeliranje dinamičkih procesa i celularni automati	158
4.3.7. Modeli bazirani na "agentima" i inteligencija jata	162

4.3.8. Informacijska determinacija evolutivne forme i genetički algoritmi	166
4.4. KOMPLEKSNI SINTETIČKI GEOMETRIJSKI I INFORMACIJSKI PROSTORNI MODELI	174
4.4.1. Multidimenzionalan dinamički geometrijski prostor	177
4.4.2. Struktura prostora digitalne geometrije	182
4.4.3. Otvoreni sintetički dinamički geometrijski modeli	185
5. GEOMETRIJSKI PROSTORNI KONCEPTI U ARHITEKTURI	188
5.1. KLASIČNI GEOMETRIJSKI PROSTORNI ELEMENTI, FORME I KONCEPTI U ARHITEKTURI	196
5.1.1. Klasični mjerni i proporcijalni geometrijski sistemi u arhitekturi	198
5.1.2. Geometrijski principi simetrije u arhitekturi	204
5.2. GEOMETRIJSKI ASPEKTI KARAKTERISTIČNIH PROSTORNIH KONCEPCIJA U ARHITEKTURI	210
5.2.1. Prostorni geometrijski koncepti drevne i klasične arhitekture	213
5.2.2. Koncept prostora srednjevjekovne zapadne arhitekture	218
5.2.3. Islamska arhitektura i geometrijska koncepcija prostora	221
5.2.4. Prostorni koncepti renesansne i barokne arhitekture	222
5.2.5. Prostorni geometrijski koncepti moderne arhitekture	225
5.3. STATIČNI I DINAMIČKI ASPEKTI ARHITEKTONSKE FORME	229
5.3.1. Dinamički geometrijski prostorni koncepti u arhitekturi	232
5.4. RACIONALNE I IRACIONALNE ARHITEKTONSKE FORME	238
5.4.1. Iracionalne prostorne arhitektonske forme	240
5.4.2. Organske prostorne arhitektonske forme	242
6. KOMPLEKSNI GEOMETRIJSKI KONCEPTI U ARHITEKTURI	246
6.1. KONTEKSTUALNI, SLOŽENI I NIVELIRANI KARAKTER ARHITEKTONSKOG PROSTORA	248
6.1.1. Nelinearna topološka arhitektonska forma	252
6.2. KOMPLEKSNE PROSTORNO-VREMENSKE FORME U ARHITEKTURI	254
6.2.1. Vremenski procesi i prirodni algoritmi transformacije forme	258
6.3. PROSTORNE ARHITEKTONSKE FORME NA RUBU HAOSA	261
6.3.1. Samoorganizacija i nedeterminirane urbane forme	263
6.4. DIGITALNA ARHITEKTURA	267
6.4.1. Dekonstrukcija klasične geometrijske forme u digitalnom prostoru	268

6.4.2. Geometrija i topologija forme od digitalnog do postdigitalnog doba	273
6.5. INFORMACIJSKO MODELIRANJE KOMPLEKSNE ARHITEKTONSKE FORME	278
6.5.1. Kompleksna informacijska strukturalna i evolutivna dinamika forme	283
6.5.2. Kompleksna modularnost i digitalna materijalnost forme	291
6.5.3. Parametarsko informacijsko modeliranje	297
6.5.4. Modeliranje multidimenzionalnog informacijskog prostora u arhitekturi	304
6.5.5. Kompleksni nedeterminirani prostor arhitektonskih prostornih modela - arhitektura između geometrijske forme i algoritma	311
ZAKLJUČNO RAZMATRANJE	318
SUMMARY	326
POPIS I IZVORI ILUSTRACIJA	334
LITERATURA	344

Predgovor

Pisati knjigu o geometriji za jednog arhitektu nije jednostavan zadatak, jer se savremena geometrija s jedne strane razvija kao visoko apstraktna matematska nauka čiji jezik postaje teško razumljiv izvan uskih matematskih okvira. Arhitektura kao inženjerska struka bavi se s druge strane kreiranjem, oblikovanjem i materijalizacijom prostornih objekata u konkretnom fizičkom prostoru. Geometrija je u svojoj ranoj fazi razvoja bila utemeljena u empirijskom iskustvu i konkretnim prostornim problemima, izrastajući u logičku ali i sintetičku konstruktivnu nauku. Prevodenjem na jezik apstraktnije matematske logike, geometrija je proširila svoje domene i razgranala se u mnoštvo dimenzija, otkrivajući sve veće bogatstvo sopstvenih struktura i formi. U arhitekturi razvoj savremene geometrije ostaje većim dijelom nedovoljno poznat, jer geometrija više nije govorila jezikom koji bi bio prevodiv na konkretne prostorne probleme arhitekture.

Postavlja se pitanje uloge geometrije u savremenoj arhitekturi novog informacijskog doba, koja predstavlja nešto više od podloge za grafičke tehnike crtanja i prezentacije projekta ili kolekcije osnovnih geometrijskih oblika i tijela. Generativni aspekti geometrije kao njen kreativni potencijal često su u teoriji arhitekture ili prenaglašeni ili marginalizirani, da bi bili ponovo aktualizirani u savremenom digitaliziranom informatičkom dobu.

Jezik današnje savremene geometrije za arhitekta je pretežno nerazumljiv, kao što je nerazumljiv i jezik programiranja koji je podloga CAD programa. Da bi bilo moguće iskoristiti sve mogućnosti koje pruža savremena računarska tehnologija u oblasti arhitekture, arhitekti se trebaju prije svega upoznati sa generalnim konceptima koji su skriveni iza različitih softverskih alata i korisničkog interfejsa, kao i njihovim generativnim i kreativnim potencijalima koji se zasnivaju na dubljim osnovama geometrijskog i informacijskog modeliranja.

Potreba za pristupom geometrijskoj apstrakciji prostora koji bi omogućio praktičnu i svrshishodnu primjenu savremenih geometrijskih koncepata i modela primjenjivih u tehničkoj i kreativnoj praksi, da bi bili uspješno sintetizirani sa savremenim informacijskim teoretskim poljima i praktičnim tehničkim digitalnim medijima, dovela je do istraživanja koja su na kraju rezultirala ovom knjigom, u cilju traženja zajedničke dublje podloge apstraktnih geometrijskih modela i informacijskog modeliranja.

Ova knjiga je namijenjena arhitektima i studentima arhitekture i u njoj su izloženi osnovni koncepti savremene kompleksne, dinamičke geometrije, koja se ne posmatra samo kao produkt računarski potpomognutog modeliranja i digitalizirane grafičke vizualizacije, već je povezana i uz klasične koncepte geometrije, da bi dobili kontinuitet i jednu razumljivu generalnu osnovu shvaćanja fundamentalnih geometrijskih koncepata. Osnovni geometrijski koncepti mogu biti izvorište ideja i konceptualnih prostornih rješenja u arhitekturi, od klasičnih arhitektonskih stilova do savremene digitalne, parametarske i kompjutacijske arhitekture.

Autor

Uvod

Izvrsna građevina, mora započeti s nemjerljivim, mora proći kroz mjerljive načine dok je dizajnirana, a na kraju mora biti neizmjerna.¹

- Louis Kahn

Geometrija kao konceptualni okvir prostornog iskustva, nadilazeći empirijsko znanje dobiva univerzalni karakter, kroz apstrahovanje i racionalizaciju modelirajući svojstva i odnose prostornih objekata i sistema, kao geometrijskih elemenata, formi i geometrijskih strukturnih obrazaca i modela. Razvijajući se od praktične discipline u oblastima zemljomerstva i gradnje, u apstrahovan matematički sistem, od euklidske deduktivne nauke do digitalnih informacijskih prostornih modela, geometrija se bavi generalnim i specifičnim prostornim svojstvima i odnosima koji mogu biti interpretirani u različitim vizualnim i kodificiranim oblicima, u različitim naukama i praktičnim inženjerskim disciplinama, pa sve do umjetničkih ekspresija.

¹ A great building must begin with the immeasurable, must go through measurable means when it is being designed, and in the end must be unmeasured. Preuzeto sa <https://www.archisoup.com/architecture-quotes>

Geometrija od svog začetka objedinjujući apstrakciju, konstrukciju i vizualnu reprezentaciju, kao i materijaliziranu interpretaciju i određene materijalne tehničke alate, postaje osnovom kako naučnog tako i inženjerskog i dizajnerskog prostornog koncipiranja i modeliranja.

Geometrijska koncepcija prostora dio je šire koncepcije svijeta u kojoj su suprotstavljeni haos, nepredvidivost i slučajnost s jedne strane, a sa druge strane red, mjera, predvidivost i svrhovitost. Geometrija je u ovako suprotstavljenim konceptima predstavljala osnovu prostorne uređenosti i determinizma. Mijenjanjem koncepcija svijeta mijenja se i uloga geometrije, od božanskog principa idealnog reda koji leži iza pojavnih neuređenosti materijalnog prostora, do naučnog modela organizacije mehanički uređenog fizikalnog svijeta, da bi u savremenoj nauci kroz koncepte geometrijskih transformacija bili povezani geometrijski zakoni ne samo sa konceptom prostora već i vremena.

Kao posrednik između idealnog i visoko apstrahovanog matematičkog domena i konkretnog fizičkog i iskustvenog svijeta, od drevnih civilizacija do informacijskih modela savremene računarske tehnologije, geometrijski definirane prostorne konfiguracije postaju primjenjive kao modeli prostornih objekata na različitim nivoima apstraktnog poimanja. Geometrijski prostorni koncepti omogućavaju eksterne i interne procese konceptualnog mišljenja i njegove reprezentacije kroz različite medije i različite prostorno-vremenske nivoje.

Kroz analizu i sintezu osnovnih geometrijskih koncepata moguće je dati uvid u potencijale geometrijskog modeliranja prostora koji ulaskom u novo informatičko doba dobivaju kompleksan dinamički karakter, nadilazeći klasične načine notacije i reprezentacije kroz programabilne informacijske sisteme i njihove kompjutacijske modele.

1

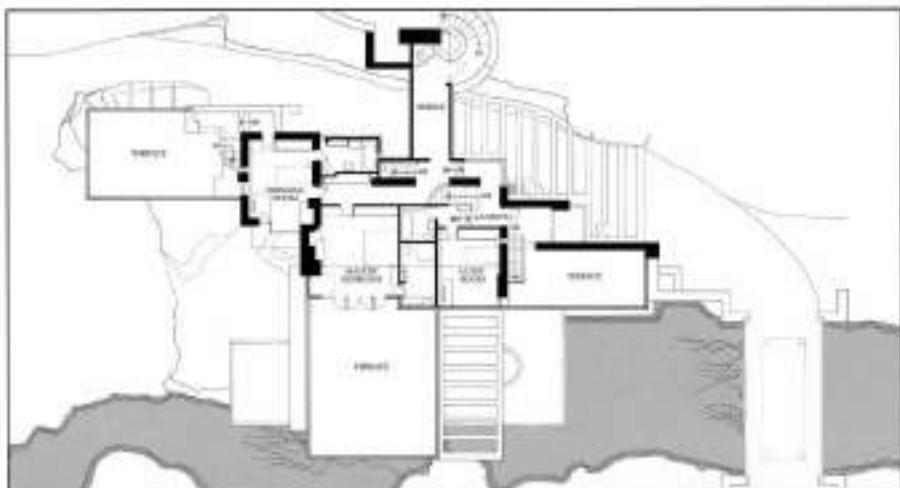
PROSTORNA KONCEPTUALIZACIJA I APSTRAKCIJA

Prostor je jedan od elementarnih pojmove koji definiraju kvalitet svijeta oko nas, utemeljen u intuitivnom, percepcijskom i praktičnom iskustvu. Prostorni koncept proizvod je složenih misaonih konstrukcija, koje odražavaju svojstva svijeta koji okružuje čovjeka. Prostor je pojmovna kategorija koja se može razmatrati s različitih aspekata: teoretskog i naučnog, praktičnog i tehničkog ili kulturnog i umjetničkog. Ovi aspekti odlikuju se različitim koncepcijama i njihovim specifičnim relacijama u okviru ljudske egzistencije i prakse.

Fizički materijalni prostor i mentalni prostor, predstavljaju dva bipolarna konceptualna okvira u kojim se prostor s jedne strane tretira kao materijalna ekstenzija a s druge kao logička i mentalna konstrukcija. Pojam prostora kao materijalne ili mentalne koncepcije, kao materijalne ekstenzije ili univerzalne nematerijalne podloge, kao relacije materijalnih objekata ili mentalnog strukturnog uzorka koji omogućava percepciju, varira kroz različite filozofske i naučne teorije, od Platona, Dekarta, Njutna, Leibnitza i Kanta, do Ajnštajnovog relativističkog zakrivljenog prostorno-vremenskog koncepta.

Iz materijalno-fizičkih prostornih koncepcija razvija se i tehnološki, dizajnirani prostor, dok se iz mentalnih razvija logički i matematičko-geometrijski prostor apstraktnih struktura.

Sinteza različitih aspekata prostora neophodan je preduslov kreativnog djelovanja u prostoru. Tehnički, dizajnirani i umjetnički prostor kao proizvod slobodnije kreativne imaginacije i prostorne reprezentacije, oslanjaju se kako na fizikalno-materijalnu tako i na mentalnu i apstraktну konceptualizaciju prostora. Klasične koncepcije prostora u savremenoj nauci dobivaju kompleksniji i integrirajući karakter, zasnovan na otkriću zajedničkih karakteristika materijalnih i mentalnih strukturalnih zakonitosti, povezujući različite konceptualne pristupe u jedinstven sistem.



*Slika 1.
Apstraktna
konceptualizacija
prostora u
arhitektonskom nacrtu.
Frank Lloyd Wright:
Fallingwater, 1935.
plan osnove.*

1.1. MATERIJALNI I ORGANSKI PROSTOR

Materijalni prostor predmet je proučavanja fizike kao nauke o prirodnim sistemima i njihovim zakonitostima. Klasična fizika definira osnovne pojmove kojima je određen fizički prostor: materije - gradivne komponente prirodnog svijeta, tijela - neorganskog oblika postojanja materije koji se može čulima registrirati, i forme - stabilnog, uređenog vida promjenjive materijalne supstance. Uz pojam materije i tijela pojavljuje se princip kretanja.

Naučni materijalizam XVII i XVIII stoljeća definira materiju kao osnovnu supstancu svijeta, stvarajući tzv. mehanički pogled na svijet, u kome je dominantna uloga čvrste materije kao mase i materijalnog tijela koje se kreće po određenoj putanji, podvrgnute jednostavnim zakonima kojima se njeno ponašanje može objasniti i predvidjeti. Struktura materije neovisna je o trajanju, kao vremenskoj dimenziji. Zatvorena u prostornu zapreminu, materija posjeduje prostorna svojstva odvojena od vremenskih.

Stvara se tzv. mehanički pogled na svijet, u kome je dominantna uloga čvrstih materijalnih tijela koja se kreću po određenoj putanji, podvrgnutih strogim, jednostavnim zakonima, kojima se njihovo ponašanje može objasniti i predvidjeti na osnovu trenutnog stanja. Prostorne karakteristike su podvrgnute racionalnom matematskom aparatu, svedive na broj, na kvantitet. Veličina, zapremina, masa i brzina postaju prostorne odrednice.

Prostor klasične naučne fizikalne koncepcije je stabilan, zatvoren deterministički ekvilibrijum, homogen i linearan, uslovjen lokacijom objekata u prostoru i vremenu kao odvojenim kategorijama. Fizički prostor klasične nauke determiniran je kao materijalna ekstenzija, svediv na kvantitete, na brojčanu mjeru. Ovakva predstava uticala je na sve oblasti ljudskog djelovanja u kojima je određenu ulogu igrala prostorna koncepcija.

Prostor i vrijeme kao modusi materijalne supstance određuju njen način postojanja, dajući promjenjivom sadržaju materije prostorne parametre - kvantitet odnosno veličinu, oblik, red i položaj.²

1.1.1. Prostor savremenih fizikalnih koncepcija

Savremena fizika po opštoj teoriji relativnosti, objedinjuje prostor i vrijeme, materiju i energiju. Prostor i vrijeme ne postoje kao zasebne kategorije, već predstavljaju strukturalno svojstvo polja. Vrijeme u savremenoj fizici postaje konstituenta procesa, kao oznaka stanja i stepen formiranja materijalnih objekata i sistema, neprekidno promjenjivog empirijskog sadržaja.

Kvantna fizika ne dozvoljava razmatranje pojave i procesa neovisno o načinu na koji ih opažamo. Pojava i promatranje su u uzročno-povratnoj vezi, definirani jedno pomoću drugog. Atom kao materijalna čestica nema strogo određenu veličinu, a oblik osnovnih elementarnih čestica je promjenjiv, podložan transformacijama.

² Branko, Pavlović. *Filozofija prirode*. Naprijed, Zagreb, 1978. p. 169.

Kompleksnost kvantnih fizikalnih fenomena nadilazi svaku klasičnu reprezentaciju. Savremena fizika otvorila je mnoga pitanja vezana za koncepte prostora i vremena, na koja svi odgovori još nisu dati. Moderna fizika proučavajući pojave na subatomskom nivou, utvrđuje dualnu prirodu materije, kao vala i čestice, otkrivajući složenu dinamiku osnovnih materijalnih čestica.

Klasičnu prostorno-vremensku prirodu posjeduju samo određene podgrupe makro svijeta, ne obuhvatajući kvantne fenomene ni mnoge kompleksne sisteme i biološke organizme. U najnovijim istraživanjima tzv. teorije haosa, pojavljuje se pojam nelinearne i haotične dinamike koja označava neke kompleksnije promjene strukturalnih stepena složenosti fizičkih i apstraktnih sistema.



Slika 2.
Grafička ilustracija haotične dinamike fizikalnih sistema.
Putanja kretanja dvostrukog klatna. (lijevo)
Ilustracija teorije haosa u vidu Lorenzovog atraktora.

1.1. 2. Prirodni organski prostor

Prirodni organski prostor predstavlja materijalnu stvarnost u kojoj egzistiraju i razvijaju se različite forme života. Prirodni prostor u savremenom dobu predmet je proučavanja nauke o prirodnim sistemima - ekologije. Obuhvatajući sav živi i neživi svijet ovakav prostor definiran je pojmom prirodne sredine.

Moderna civilizacija utemeljena je na antropocentričnoj slici svijeta, zasnovanoj na naučnim otkrićima u 16. stoljeću, kojim se u radovima Keplera, Galileja i Njutna prirodni procesi tumače u vidu mehaničkog kretanja materijalnih tijela u praznom prostoru, u skladu sa univerzalnim matematskim zakonima. Mehanička slika svijeta razvija se i Kartezijskim razdvajanjem uma i tijela, duhovnog i materijalnog, dajući prirodnom svijetu odlike materije bez svijesti, koja je pripisivana samo čovjeku. Čovječanstvu je data moć razumijevanja i kontroliranja cjelokupne prirode. Priroda postaje predmetom istraživanja i eksploatacije, podvrgnuta dominaciji čovjeka.

Primjenom klasične predstave na prirodni prostor, tretirajući ga kao kvantitativnu, statičnu, homogenu strukturu, ne vodeći računa o kompleksnosti ili limitima koji karakteriziraju prirodne procese, ljudska civilizacija svojim intervencijama u prostoru zasnovanim na mehaničkim principima, ruši organsku ravnotežu ekspanzijom tzv. tehnosfere, koja se neograničeno širi na račun biosfere. Fragmentiran pristup kompleksnom karakteru geoloških, bioloških, klimatskih, etnoloških, psiholoških aspekata prostora, dovodi do krize izazvane zagušenjem svih prirodnih procesa pa time i krize čovjekove prirodne sredine.

Prirodni prostor predstavlja cjelovit, otvoren dinamički sistem. Cjelovitost se odražava kroz uzajamnu povezanost i interakciju svih dijelova. Karakteristika prirodnih sistema je dinamičnost i kompleksnost organizacije. Svaki pojedinačni prirodni sistem egzistira u složenoj mreži različitih uslova i utjecaja iz okoline, s kojom tvori dinamičnu cjelinu.

Organski prirodni prostor posjeduje dinamičku stabilnost koja je rezultat složenijih dinamičkih razvojnih procesa koji uključuju i vremensku dimenziju. Prostorni entiteti svojom aktivnošću uspostavljaju kompleksnu mrežu međuodnosa, stvarajući zapleten sistem jedinice i njene okoline.



Slika 3.
Kompleksnost prirodnog prostora.

Prirodne forme odlikuju se prepletenom mrežom oblika, nejasnim granicama i višeslojnim teksturama.

1. 2. OPAŽAJNI, VIZUALNI I INFORMACIJSKI PROSTOR

Kant postavlja tezu o prostoru i vremenu kao uslovima i svojstvima našeg opažaja stvari, odnosno kao strukturama naše svijesti koje predstavljaju apriorne kategorije čulnosti.³ Pri razmatranju pitanja vezanih uz pojam prostora nezaobilazno postaje razjašnjenje kategorije opažajnog prostora. Procesima opažanja, informacije o vanjskom svijetu dobivene putem čulnih organa i nervnog sistema, selektiraju se, registriraju i organiziraju u uređene smislene cjeline.

Opažajni procesi integrišu fizičko-hemijske i mentalne procese. Opažajni prostor predstavlja svijest o okolnom svijetu i njegovim svojstvima koja djeluju na sva čula. Sve informacije o prostoru koje nam o njemu posreduju naša čula omogućavaju orientaciju i svrshishodno djelovanje – akciju i reakciju.

Čulom vida registruje se najveći obim informacija o vanjskom svijetu. Vizualni prostor je proizvod složenih opažajnih procesa koji omogućavaju sintetiziranje osjećaja prostornosti i doživljaja cjelovitosti njegovih kvantitativnih i kvalitativnih karakteristika. Opažajni procesi temelje se na strukturaciji informacija iz vanjske sredine koje obrađuje nervni sistem. Vizualni prostor predstavlja model stvarnog svijeta na osnovu strukturnih i informacijskih principa selekcije, organizacije i interpretacije svjetlosnih podataka iz vanjske sredine.

3 B. Pavlović. *Filozofija prirode*. 1978. pp. 72-75.

Jedinstvenost vizualnog doživljaja i cjelovitost vizualnog prostora odražava se kroz cjelovitost opažajnih oblika koji predstavljaju složenu strukturu, nastalu grupiranjem određenih vizualnih sklopova. Vizualni oblik predstavlja organizaciju vizualne informacije u neku shvatljivu strukturu. Prema zakonima vizualnog opažanja svaka konfiguracija informacija iz vanjske sredine teži da bude viđena na takav način da proistekla struktura bude jednostavna koliko to dati uslovi dopuštaju.⁴

Zakoni spontane senzorne organizacije, defirani su u okviru Geštalt teorije percepције, kojom su utvrđeni principi formiranja osnovnih vizualnih konfiguracija preko kojih se percipiraju cjeloviti vizualni oblici, forme i uzorci.⁵ Principima blizine, kontinuiteta, zatvorenosti, sličnosti i simetričnosti, pojedinačni vizualni elementi formiraju celine.

Figura i pozadina, kontinuirana površina i ivica, osnovni su elementi formiranja vizualnog prostora. Zakonitost opažanja figure i pozadine jedna je od osnovnih tendencija organizacije procesa opažanja. Dio vizualne slike uvijek se opaža kao figura a dio kao osnova, na osnovu strukturiranosti, zatvorenosti i veličini površina. Površine i granice vizualnih oblika nastaju kao rezultat određene vizualne teksture. Varijacije koje se odražavaju u relacijama svjetlosnih tačaka rezultiraju kao površine u slučaju raštrkane organizacije ili naizmjeničnog ponavljanja tačaka, a prelazna organizacija daje graničnu liniju - konturu.⁶

Vizualni oblici kao slika ili projekcija podložni su promjeni (transformaciji), uslijed dinamičkog karaktera percepције. Prostorni i vremenski kontekst utiče na povezivanje pojedinačnih slika preko strukturalne sličnosti.

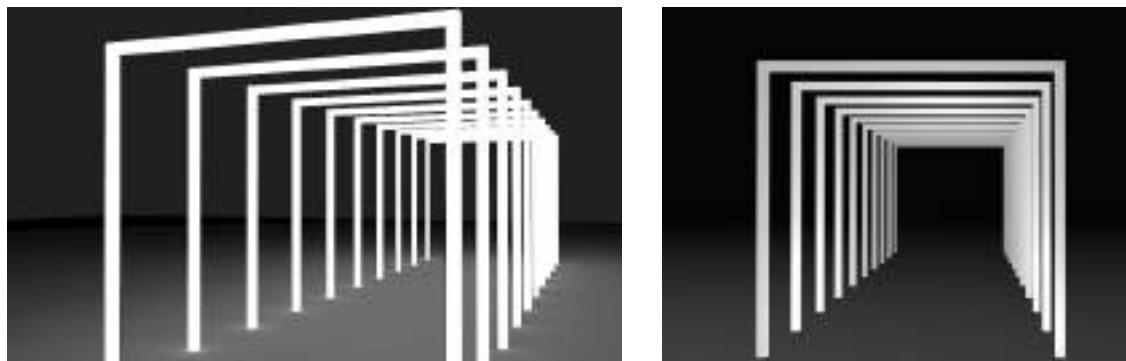
⁴ Rudolf, Arnheim. *The dynamics of architectural form*. University of California Press, London, 1977. p. 59.

⁵ Wolfgang, Keler. *Geštalt psihologija*. Nolit, Beograd, 1985.

⁶ James, Gibson. *The perception of the visual world*. Cambridge Press, 1950. pp. 8-9, 63-66.

Vizualne strukture koje pokazuju određeni kontinuitet kroz neprestane transformacije vizualnih projekcija, zapažaju se kao jedinstven prostorni sklop. Percipirana cjelina ima integriranu strukturu. Pojedinačni elementi su u funkciji ovisnosti o mjestu i ulozi u opštem sklopu. U vizualnom prostoru kao neki izdvojeni oblik postaju zapažene takve strukture koje pokazuju određeni kontinuitet uprkos neprestanim transformacijama vizualnih projekcija na kojima se zasnivaju, izražen kroz invarijantna svojstva takvih transformiranih struktura.

Opažajni prostor je kompleksnog, dinamičkog karaktera, nastao kao proizvod složenih psihofizioloških procesa koji učestvuju u obradi komplikovanih informacijskih struktura iz vanjske sredine. Rezultanta je međusobnog djelovanja organizma i njegove okoline, i posljedica djelovanja istovrsnih principa organizacije opaženog svijeta kao i aktivnosti koje dovode do opažanja.



*Slika 4.
Dinamički karakter percepcije i transformacije vizualnih oblika*

Po Gibsonu neki prostorni aspekti koji se pripisuju geometrijskim konceptima, nisu samo mentalni već i fizički, jer su varijable vizualnih formi kao što su kontura, površina, nagib, ugao, pokret, udaljenost, dubina, korespondentne varijablama distribucije fokusiranog svjetla.⁷ Osnovni geometrijski principi nisu proistekli samo iz logičkog apstraktnog mišljenja već iz fizičkog svijeta i njegove senzorne informacijske stimulacije i direktnе senzorne percepcije.

Vizualni oblici nastaju ne samo kao slika na mrežnjači oka, već kao sveukupnost vizualnih iskustava, u kontekstu vizualnih relacija u okviru date cjeline vizualnog sklopa, koji tvori vizualni doživljaj. Iako su vizualni oblici određeni svojim granicama, oni utiču jedan na drugi. Jedinstvenost vizualnog doživljaja i cjelovitost vizualnog prostora odražava se i kroz cjelovitost opažajnih oblika koji i sami predstavljaju složenu dinamičku strukturu, nastalu grupiranjem određenih vizualnih sklopova.

Savremene teorije percepcije moraju s jedne strane obuhvatati kognitivne procese i unutarnje mentalne strukture koje obradom informacija ostvaruju model svijeta i prostora, a s druge strane direktne utjecaje i aktivnosti koje povezuju fizički svijet i opažatelja u jedinstven sistem. Savremeni pristup psihologiji opažanja, proces percepcije tretira kao aktivno istraživanje cjelokupnog ljudskog organizma. Dinamički karakter percepcije uvezuje transformacije vizualnih oblika u koherentnu cjelinu. Perceptivni sistem prilagođen je potrebama organizma u pokretu, u akciji i razvoju. Ovakav sistem rezultat je aktivnosti i pojedinačne individue u toku života, ali i cijele vrste u evolucijskom razvoju.

⁷ J. Gibson. *The perception of the visual world*. 1950. p. 187.

1.3. APSTRAKCIJA PROSTORA

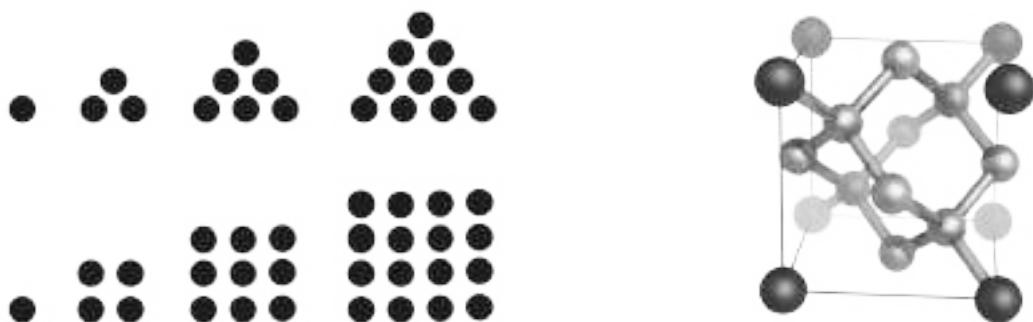
Pojam apstrakcije ima više značan karakter, a njegova definicija ovisi o tome u kom kontekstu je primijenjen, tako da se različiti aspekti odražavaju u filozofiji, nauci i umjetnosti. Princip apstrakcije smatra se jednim od ključnih procesa inteligentnog mišljenja, koji omogućava kompleksnije spoznajne procese ljudskog uma.

Apstrakcija je proces u kome se vrši određena separacija svojstava ili funkcija objekata u nekom složenom sistemu, a s druge strane objedinjavanje i simplifikacija kompleksnijih sistema i objekata. Apstrakcijom se povezuju različite informacijske strukture njihovim zajedničkim svojstvima. Apstrakcija je povezana uz princip generalizacije, kojom se smanjuje informacijski sadržaj nekog posmatranog fenomena, u svrhu zapažanja nekih bitnih relevantnih informacija, reducirajući kompleksne informacije u jednostavnije generalne koncepte. Apstrakcija zahtijeva određen simbolički aparat ili jezik kojim se osnovne relacije mogu izraziti i istražiti njihova organizacija. Apstrakcija je fundamentalna podloga logičkog, naučnog, tehničkog i umjetničkog istraživanja, otkrivanja i kreiranja novih sadržaja u različitim medijima i na različitim nivoima realne egzistencije.

U mnogim naučnim područjima apstrakcija predstavlja odvajanje od senzornog, fizičkog i prirodnog svijeta, odnosno simplifikaciju njegove izuzetne kompleksnosti, u svrhu otkrivanja unutarnjih zakona i principa organizacije, te ovladavanja složenim procesima i sistemima.

Apstrakcijom neki elementi ili svojstva nekog objekta, sistema ili procesa mogu biti odvojeni od njihovog specifičnog konteksta, a apstraktni objekti se mogu definirati kao objekti odvojeni od realnosti, jer nisu locirani u određenom specifičnom prostornom i vremenskom kontekstu.⁸

Apstrakcije mogu sadržavati generirajući princip određene pojedinačne prostorne i vremenske forme ili procesa. Generativni principi istraženi ili kreirani na nekom apstraktном nivou, mogu biti primijenjeni u nekom specifičnom konkretnom domenu, bazirajući primjenu na strukturnoj ekvivalentnosti ili sličnosti funkcija i procesa na različitim nivoima apstrakcije, sukcesijom u sve većem obimu detalja ka nižim nivoima apstrakcije.



Slika 5.
Apstraktne strukture u specifičnom prostornom poretku.

Triangularni i kvadratni Pitagorejski brojevi klasične Grčke matematike.
Kubična kristalna struktura dijamanta (desno).

⁸ L. Saitta, J. Zucker. *Abstraction in Artificial Intelligence and Complex Systems*. Springer Science & Business, 2013. p. 12.

Svaka apstrahovana struktura je cjelina, sastavljena iz uzajamnih odnosa elemenata, pojava ili procesa, koji su međusobno povezani i čiji karakter je ovisan o unutarnjim međuodnosima. Po Pijažeu "struktura je sistem transformacija koja sadrži svoje zakone upravo zato što je sistem, dakle ti zakoni su različiti od svojstava elemenata".⁹

Možemo govoriti o dvije vrste struktura: otvorenim i zatvorenim strukturama. Zatvorene su na izvjestan način završene i predstavljaju, bar privremeno, oblik postojane ravnoteže. Otvorene strukture su u stalnom procesu konstituisanja i rekonstituisanja, predstavljajući postojanu formu kontinuiranih transformacija, dakle imaju dinamički karakter.

Svako apstraktno predstavljanje neke realne stvarnosti, stvaranje je jedne nove strukture koja na neki način preslikava strukturu onoga što je predstavljeno. Ovo preslikavanje nije direktno identično kopiranoj stvarnosti. Ono se uvijek apstrahuje na nekom jednostavnijem nivou složenosti, pa samim tim elementi struktura nisu direktno identični, već se ostvaruje određena korelacija. Strukturne cjeline su jedna drugoj korespondentne po principu sličnosti.

Svakim posrednim, apstraktnim predstavljanjem, nešto se na nekom nivou složenosti gubi. Očigledno da ni jedna apstraktna predstava nije dovoljna da u potpunosti opiše ili oslika realni svijet. Iz različitih apstraktnih koncepata i njihovih područja primjene, proizašli su različiti naučni konceptualni i reprezentacijski sistemi i njihova područja.

Geometrijska apstrakcija jedan je od fundamentalnih principa na kojima se zasniva promišljen pristup razumijevanju prostornih relacija i prostornih objekata, njihove vanjske i unutarnje forme kao oblika i kao strukture.

⁹ Žan, Pijaž. *Epistemologija, nauka o čovjeku*. Nolit, Beograd, 1979. p. 211.

1. 4. GEOMETRIJSKI PROSTOR

Geometrija kao oblast matematičkih nauka, predstavlja formalno utemeljen naučni sistem koji kroz apstrakciju prostornih objekata, definira osnovne prostorne elemente i zakonitosti njihovog povezivanja. Iako je u matematičkim naukama tretirana kao potpuno apstraktни formalni deduktivni sistem, geometrija je zasnovana na konkretnom iskustvu i intuiciji procesa opažanja, orientacije i kretanja u vanjskom okruženju.

Po mnogim izvorima geometrija svoje porijeklo ima u rješavanju praktičnih prostornih problema vezanih za regulaciju zemljишnih posjeda i graditeljstvo starih civilizacija Mesopotamije, Egipta i Kine. Apstrahovani su osnovni prostorni geometrijski oblici u vidu geometrijskih figura i tijela kao i njihovih dijelova, te njihovi prostorni kvantitativni parametri veličina. Uspostavljeni su osnovni relacijski odnosi dužina, površina i volumena, te njihove jednakosti i omjera. Geometrija u periodu svog začetka predstavlja skup pravila empirijskog karaktera, potvrđenih iskustvom i primijenjenih uz pomoć praktičnih alata.¹⁰

Geometrija je kroz svoj historijski razvoj dobivala sve generalniju i univerzalniju formu, od praktične tehnike mjerena do visoko apstrahiranog logičkog matematiziranog sistema, koji svoju osnovu dobiva u klasičnoj grčkoj naučnoj i filozofskoj praksi.

¹⁰ J. L. Heilbron. *Geometry Civilized, history, culture and technique*. Oxford University Press, New York, 1998. pp. 29-31.

1.4.1. Euklidska geometrija

Geometrija nastaje kao rezultat misaonih apstrakcija percipiranih informacija konkretnog doživljenog prostora, simboličke reprezentacije i stvaranja logičkog sistema apstraktnih formi i njihove povezanosti. Sistemski vid geometrija je dobila oko 300 god. p.n.e. u Euklidovim "Elementima", fundamentalnom klasičnom djelu koje predstavlja osnovu naučnog pristupa primjeni apstraktnih zakona logičkog prostornog mišljenja na univerzalnim principima.

Euklidovi "Elementi" se smatraju jednim od najznačajnijih pisanih naučnih dokumenata ljudske civilizacije, u kome su sistematizirana znanja hiljadugodišnje empirijske tradicije u jedan visoko apstrahovan sistem, predstavljajući temelj geometrijskog prostornog poimanja sve do savremenog doba.

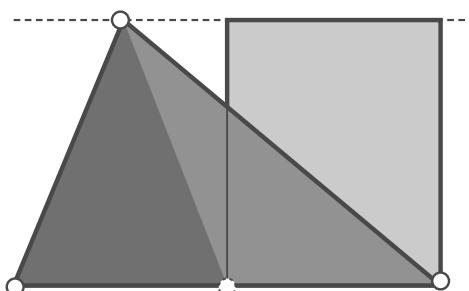
Iako postoje mnoge dileme u pogledu sadržaja izvornog djela Euklida, jer je original mijenjan u različitim prevodima, razjašnjenjima i tumačenjima, osnovna struktura i način izlaganja bazirani su na aksiomatskom sistemu postavljanja osnovnih tvrdnji na kojima se deduktivno gradi i razvija čitav sistem teorema i njihovih dokaza, koji su posljedica osnovnih tvrdnji i prethodnih propozicija.

Osnovna struktura Euklidovih "Elemenata" data je u vidu postulata i aksioma koji imaju funkciju tvrdnji za koje nisu izloženi dokazi. Postulati definiraju položajne relacije osnovnih geometrijskih elemenata: tačaka, pravaca i kružnica. Uz pet postulata dodatno su razjašnjeni i osnovni pojmovi jednakosti veličina i odnosa dijela spram cjeline.

Euklidska geometrija odvaja se od iskustvenog fizičkog prostora, baveći se osobinama elemenata i figura koji postoje nezavisno od materijalnog sadržaja i fizičke dimenzije prostora. Prostorni elementi i figure reducirani su na apstraktnu kompoziciju jedinstvenih, univerzalnih strukturalnih elemenata: tačaka, pravaca i ravnina.

Kroz prvih pet poglavlja koja obuhvataju osnovnu geometriju u ravni, geometrijsku algebru, kružnice i uglove, pravilne poligone, omjere i geometrijske proporcije, Euklidska geometrija bavi se univerzalnim svojstvima prostornih objekata koja su određena zakonima absolutnog karaktera, dokazivim kroz logičke strukture dedukcije. Dokazi se temelje na osnovnim definicijama kao očiglednim istinama intuitivne spoznaje i aksiomima, fundamentalnim, nezavisnim tvrdnjama koje su date kao istine koje, iako su proizašle iz empirijskih, postaju generalne i univerzalne.

Euklidska geometrija iz najjednostavnijih aksioma kojima su definirana svojstva osnovnih elemenata izvlači dedukcijom relacijske odnose i zakonitosti kojim su uređeni međusobni odnosi elemenata neke prostorne figure. Odnosi dužina, odnosi uglova, konstrukcija figura na osnovu poznatih elemenata - dužina i uglova, određivanje elemenata na osnovu njihovih relacijskih odnosa, predmet su teorema euklidske geometrije.



Slika 6.
Ilustracija geometrijskih zakonitosti Euklidske geometrije.

Uspostavljanje relacije jednakosti površine trougla i pravougaonika.

Ilustracija Propozicije 41 i 42, knjiga 1,
Euklidovi Elementi.

1.4.2. Razvoj geometrije kao apstraktnog prostornog modela

Cjelokupan razvoj nauke, govori o otvorenom karakteru svih naučnih modela stvarnosti, što se može utvrditi i u historijskom razvoju geometrije. Geometrijski model prostora je kroz razvoj nauke dopunjavan, proširivan i modificiran, u skladu s koncepcijama prostora proizašlim iz različitih predstava logičkog ili intuitivnog karaktera, uslovljenih razvojem ljudske misli, bilo religijske, filozofske ili naučne.

Temelji geometrije su intuitivne predstave prostora, psihosenzornog karaktera, iz kojih potiču osnovni apstraktni geometrijski pojmovi. Osnovne prostorne relacije, vezane uz geometrijske zakonitosti, zasnivaju se na principu mjerjenja, upoređivanja izvjesnih uočenih generalnih odnosa kao prostornih kvantiteta. Time je zasnovan naučni pristup konceptu prostora, koji se u apstrakciji udaljava od svakidašnjeg realnog prostora, da bi obezbijedio sistematičnost i univerzalnost.

Apstraktna matematski definirana geometrija ne daje neposredne istine o opaženom fizičkom svijetu, već se razvija kao teorija logičkih struktura, koja predstavlja apstraktni model prostora. Geometrija se u savremenoj matematici potpuno odvaja od praktične empirijske svrhe, kroz strukturalni logički formalizam deduktivnog sistema u kome se aksiomatskim metodom uspostavljaju pravila i lanac propozicija i zaključaka koji slijede pravila. Razvoj analitičke geometrije u 17. st. povezuje geometriju i algebru, Kartezijanskim koordinatnim sistemom u kome je svaku prostornu tačku moguće predstaviti njenim korespondentnim parom koordinata (brojeva). Time je objedinjen numerički i geometrijski prostor.

David Hilbert je početkom 20. stoljeća dao novu strukturu Euklidskoj geometriji, na jednom generalnijem nivou apstrakcije.¹¹ Po Hilbertu za logički razvoj geometrije potreban je samo mali broj jednostavnih, fundamentalnih principa - aksioma, čiji izbor i veze potpuno determiniraju datu geometriju. Na tim osnovama dao je novu formu sistema nezavisnih aksioma iz kojih je dedukcijom izveo teoreme i zaključke analogne euklidskoj geometriji.

Cjelokupna geometrija je zasnovana na tri različita sistema objekata: tačkama, pravcima i ravninama, kao elementima linearne, planarne i geometrije trodimenzionalnog prostora. Njihove relacije definirane su kao: pripadanje, između, paralelno, kongruentno (podudarno), kontinuirano i dr. Ove relacije su suštinski sadržaj aksioma, koji su organizirani u slijedećim grupama: aksiomi povezivanja, aksiomi poretku, aksiomi paralelnosti, aksiomi kongruencije i aksiomi kontinuiteta.

Matematički strukturalizam cijelu matematiku podvrgava hijerarhiji aksiomatskog sistema, gdje elementi nisu bitni svojim karakterom već povezivanjem.¹² Najminimalnijim setom aksioma date su generalnije strukture, a dodavanjem novih aksioma dobiva se bogatstvo sve specifičnijih struktura.

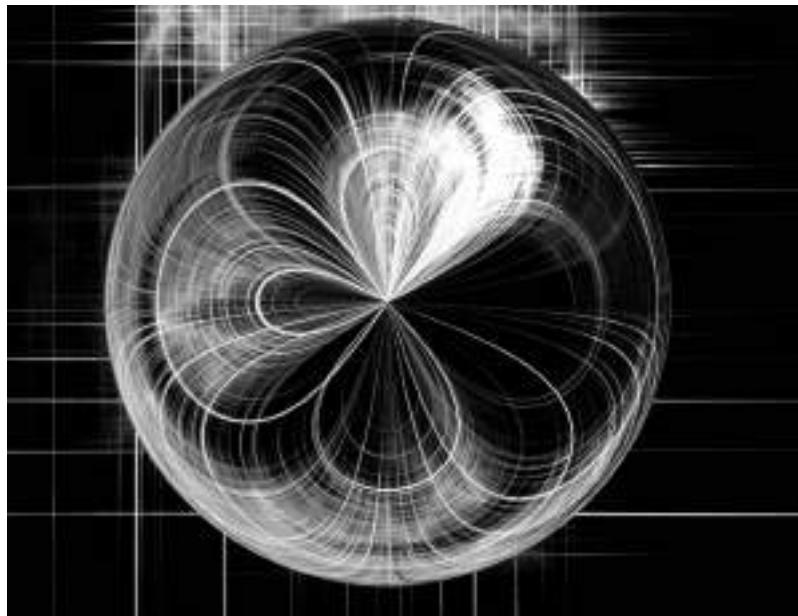
U geometriju se uključuju i mjerne vrijednosti koje se ne mogu izraziti na jednostavan klasičan način, kao i elementi koji imaju beskonačne odrednice. Geometrijske veličine nisu samo statične vrijednosti već postaju promjenjive, kao parametri određenih funkcija. Relacije veličina nisu izražene samo kao mjere ili proporcije, već i kao funkcionalne odrednice koje mogu biti definirane preko globalne ili lokalne analize geometrijskih objekata i elemenata.

¹¹ David, Hilbert. *Foundations of Geometry*. The Open Court Publishing Company, La Salle, 1950.

¹² N. Bourbaki. *The Architecture of Mathematics*. *The American Mathematical Monthly*, Vol. 57, No. 4. 1950. pp. 221-232.

Dok se Euklidska geometrija pretežno bavi prostornim relacijama i problemima u ravni, novija područja geometrije, kao što je diferencijalna geometrija, determiniraju složenije objekte - različite tipove krivulja i zakriviljenih površina.

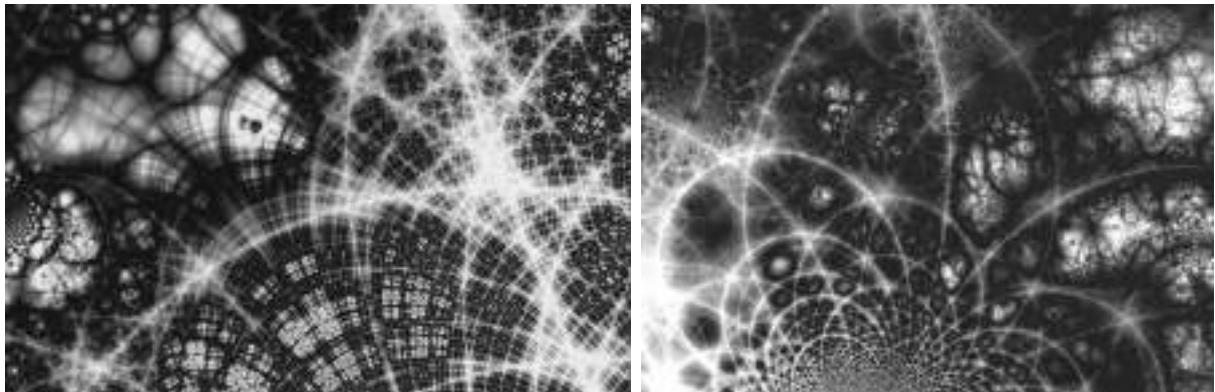
Otvaranje novih područja geometrije, često nazivanih novim geometrijama, kao što su analitička i projektivna geometrija u 17. stoljeću i uz njih nacrtne geometrije u 18. st., neeuklidskih geometrija u 19. st., a krajem 20. stoljeća fraktalne geometrije, rezultat su proširivanja geometrijskog modela u skladu s naučnim i tehnološkim dostignućima određenog razvojnog perioda.



Slika 7.
Vizualizacija geometrijske
forme zakriviljenih prostora u
računarskoj grafici.

Fraktalna geometrija izlazi iz okvira klasične determinacije geometrijskih formi modelirana i vizualizirana pomoću informatičke tehnologije i računarske grafike.

Geometrija dobiva sve složeniju strukturu, granajući se u specijalizirana područja, bazirana na sve višim nivoima apstrakcije. Ipak, čak i najapstraktniji geometrijski sistemi, svoju primjenu su našli u praktičnim poljima nauke i tehnike, od savremene fizike, do računarske tehnike koja postaje nezaobilazna u svim područjima razvoja savremene civilizacije.



*Slika 8.
Vizualizacija prostora fraktalne geometrije uz pomoć računarske grafike.*

1.4.3. Primijenjena geometrija i sintetičko modeliranje prostora

Razvoj nauka, posebno fizike i matematike, koje su se bavile i pojmom prostora, uticao je na razvoj tumačenja, principa i zakona geometrije. Oslobađajući je njene uloge nauke o prostoru primjenjive na realni svijet, matematika odvaja dokaze njenih zakona od vizualizacije, isključivši pitanja o konstituisanju prostora od apstraktnih elemenata prevodivih u fizički prostor.

Matematski prostor definira relacione odnose kao primarne, a dokazi se izvode bez potrebe za konkretnijim predstavljanjem njegovih elemenata. Geometrija je kao matematska grana nauke ipak čvrsto povezana uz nauku o fizikalnom prostoru, predstavljajući temelje na kojima se zasniva klasična fizika. Prostor klasične fizike je klasični euklidski geometrizirani metrički prostor definiran Dekartovim sistemom, prostor u kome se odvija mehanika Njutnove fizike i materijalnih tijela u ravnoteži ili pravilnom kretanju, čija je organizacija podvrgnuta zakonima geometrije.

U svom začetnom vidu geometrija predstavlja spoj empirijskog iskustava i apstrakcije, sintezu fizičke i logičke stvarnosti. Za razliku od algebarskih koncepcija, koji su predstavljene simbolima koji mogu biti zamijenjeni bilo kojim drugim simbolima, geometrijski koncepti često su reprezentirani u klasičnoj geometriji grafičkim elementima koji imaju prostorna svojstva koja direktno mogu biti demonstracija geometrijskih relacija.

Iako se matematički razvoj uporno pokušavao osloboditi vizualizacije i grafičke konstrukcije, slijedeći misao grčke filozofije o nepouzdanosti i nekonzistentnosti fizičkog i vizualnog prostora, geometrijska grafički interpretirana vizualizacija ostala je prateći model klasične mehanike i svih oblasti inženjerstva.

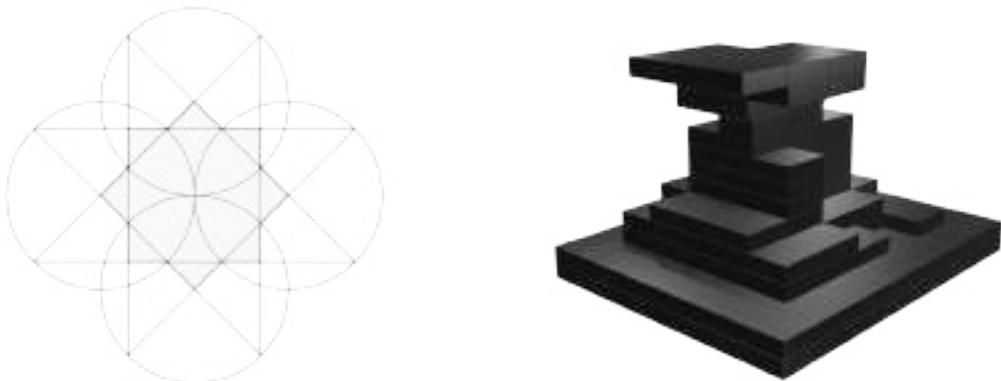
Grafički interpretiran model geometrije koji se primjenjuje u inženjerstvu i tehnici je apstraktni sintetički model, koji predstavlja posredni stepen između visoko apstrahiranog matematičkog modela i konkretnih nivoa fizičkog materijalnog i egzistencijalnog prostora, omogućivši korelaciju i koordinaciju između ova dva nivoa. Primjenjivost grafički interpretiranog modela geometrije zasnovanog na vizualnoj prezentaciji osnovnih geometrijskih elemenata i njihovih relacija, utemeljena je u psihosenzornom porijeklu pojma prostornosti.

Dok se u čisto matematički interpretiranom modelu geometrije, uspostavlja korespondentni model prostora preko matematskih simbola, koji se uglavnom odnose na relaciona svojstva elemenata, odvajanjem logičkih formi od realističnog, fizičkog ili intuitivnog, dotle se u grafički interpretiranom modelu geometrije realizira korespondentna slika prostora preko posebnih grafički konstruiranih elemenata, koji u sebi sadrže osnovne prostorne kvalitete analogne realnom, fizičkom prostoru.

Primjena geometrije kao konceptualnog okvira u tehničkom smislu obuhvata različite praktične vidove kao:

- mjerne odnosno metričke aspekte geometrije,
- konstruktivne aspekte geometrije,
- reprezentacijske aspekte primijenjene geometrije.

Naprijed navedeni aspekti, kao rezultat specifikacije geometrijskog poimanja i modeliranja prostora, nisu odvojene kategorije, već su uzajamno povezani u okvirima primijenjene geometrije. Primjenjena geometrija se razvija u nekoliko grana od kojih je u tehničkoj praksi najraširenija nacrtna geometrija koja obuhvata složene probleme koordinacije dvodimenzionalne i trodimenzionalne geometrije. Potrebno je naglasiti da se različiti aspekti i pristupi geometrijskoj apstrakciji prostornih odnosa međusobno nadopunjavaju. Sintetizacija prostornih geometrijskih aspekata i modela predstavlja jedinstven geometrijski sistem prostorne konceptualizacije i modeliranja primjenjivog u tehničkoj praksi.



Slika 9.

Konstruktivni i reprezentacijski aspekti geometrije.

Geometrijska konstrukcija složene geom. figure i trodimenzionalna prostorna reprezentacija geometrijske forme pomoću računarske grafike.

2

GEOMETRIJSKI PROSTORNI KONCEPTI

Razvoj geometrije prati razvoj određenih geometrijskih koncepata. Koncept idealne geometrijske forme, zatvorene i otvorene geometrijske figure, kontinuiteta i linearnosti, identičnosti i veličine, omjera, proporcije i dimenzije, kretanja, transformacija i simetrije, temeljni su geometrijski koncepti koji su rezultirali bogatstvom teoretskih geometrijskih sistema i njihovih područja, ali i širokom primjenom ovih koncepcija u konkretnoj ljudskoj djelatnosti: nauci, tehniči i umjetnosti.

Primjena geometrije u nauci bazirana je na primjeni njenih teoretskih zakonitosti, a često su razvoj geometrije i nauke međusobno uslovljeni. Mnoge geometrijske teorije proizašle su i iz praktičnih problema, ne samo u ranom razvoju geometrije, jer iza mnogih značajnih geometrijskih otkrića stoje inženjeri i umjetnici, kao što je slučaj sa projektivnom i nacrtnom geometrijom. S druge strane umjetnost i tehnika ne oslanjaju se tako striktno na sistematizirane i formalizirane aspekte apstraktnih geometrijskih matematskih struktura.

Primjena geometrije u umjetnosti i tehnici kreće od oslanjanja na primjenu generalnih geometrijskih koncepata, preko njihovog intuitivnog tumačenja koje ne podrazumijeva poznavanje cjelokupnog teoretskog osnova niti specifične matematske logičke simbolike i aksiomatskog deduktivnog ustrojstva. Tehnika i umjetnost primjenu geometrije baziraju na prevođenju geometrijskih koncepata i zakona u drugačiji simbolički jezik od matematičkog. Stoga se proučavanje geometrije u sklopu područja umjetnosti ili tehnike, ne može bazirati isključivo na visoko apstraktnom nivou matematskih geometrijskih struktura, već zahtijeva specifičan uvid u konceptualnu širinu geometrije i njene posebne načine interpretacije.



Slika 10.
Geometrijski koncepti i simbolički jezik geometrije u umjetnosti.
El Lissitzky, Proun, 1922-23.

2.1. GEOMETRIJSKE FORME, FIGURE I TIJELA

Platonska filozofska škola, na čijim se idejama zasniva cijelokupna klasična nauka, pretpostavlja apstraktne geometrijske forme kao temeljne forme prirode stvari koje, iako skrivene i nevidljive čulima, predstavljaju posredna sredstva u istraživanju stvarne prirode. Suprotstavljanjem apstraktnih idealnih formi, kao nepromjenjivih i neprolaznih, konkretnim prirodnim formama kao prolaznim i promjenjivim, podložnim nastajanju i propadanju, dolazi do podjele na matematsko-geometrijske apstraktne forme i materijalne prirodne forme promjenjivog empirijskog sadržaja.

Apstraktne forme po platonističkim principima predstavljaju forme-ideje, dok se materijalne forme odnose na realne fizičke i organske oblike prirodnog svijeta. Razdvajanjem apstraktnih formi kao formi uma i konkretnih materijalnih formi kao čulnih formi, klasična nauka odvaja prirodni svijet i čulne informacije o njemu od logičnog poimanja. Apstraktna geometrijska predstava prostora smatra se nezavisnom od direktnog neposrednog iskustva čulnog i doživljenog prostora.

Matematskim pristupom razdvajaju se geometrijska forma kao stabilna i nepromjenjiva, i njen vizualni oblik, podložan neprestanim promjenama. Apstrakcija i nepromjenjivost temeljnih geometrijskih struktura vežu se uz stabilnost i trajnost njihove geometrijske strukture.

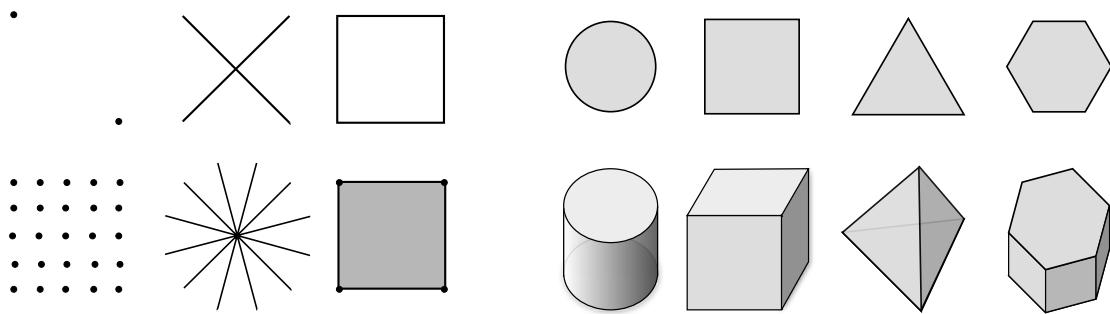
Apstraktna euklidska geometrijska ravan predstavlja referentni nivo na kome se uspostavlja struktura geometrijskog prostora. Ravan je kontinuirana i homogena, neprekidna i neograničena. Primjenom principa jednostavnosti, koji je fundamentalni princip svih fizičkih procesa uočenih u prirodnom svijetu, formiran je euklidski geometrijski model prostora. Unutar ovog modela definirani su prostorni elementi i forme.

Kao model koji oslikava neprolazne i trajne prostorne forme, klasičan geometrijski model omogućio je prostornu predstavu univerzalnog karaktera. Generalni pojmovi kao što su: tačka, pravac, ravnina, prostor, kao logički pojmovi oslobođeni iskustvenih empirijskih ograničenja, su bez limita i granica, pripadajući domenu beskonačnog.

Euklidska geometrija utvrđuje svojstva generalnih klasa geometrijskih objekata, kao geometrijskih figura u ravni i trodimenzionalnih prostornih geometrijskih tijela. Geometrijske figure su prostorne konfiguracije koje uključuju više osnovnih geometrijskih elemenata koji u određenim relacionim odnosima čine jedinstvenu cjelinu. Geometrijska figura u klasičnom euklidskom geometrijskom modelu prostorno je definirana sastavnim elementima, graničnom konturom, veličinom, položajem i orijentacijom.¹³

Granice figura definirane su osnovnim geometrijskim elementima: tačkama, linijama i površinama. Geometrijske figure mogu biti konfiguracije geometrijskih elemenata u ravnini ili u prostoru, pa se za dvodimenzionalne prostorne konfiguracije u ravni uglavnom koristi izraz geometrijska figura ili lik, a za trodimenzionalne prostorne konfiguracije izraz geometrijsko tijelo ili solid.

13 po Euklidovoj definiciji: Figura je ono što je zahvaćeno nekom granicom ili granicama, u Stefan, Barker. *Filozofija matematike*. Nolit, Beograd, 1973. p. 46.



*Slika 11.
Geometrijske figure i tijela kao otvorene i zatvorene prostorne konfiguracije geometrijskih elemenata euklidskog prostora.*

Osnovne geometrijske figure euklidske geometrije nisu tretirane kao izolovane kategorije već su stavljene u međusobnu vezu, tako de se npr. zakonitosti koje su važeće za trouglove prenose se i na četverougaonike. I kružnica koja je suštinski posebna kategorija u odnosu na pravolinijske figure, svedena je na osnovne zajedničke planarne odnose ugla i linearnosti.

Sve plošne figure, iako se mogu razvrstati u pojedinačne kategorije koje se zatim po određenim karakteristikama mogu razvrstati u podvrste (npr. trouglovi u jednakostranične, jednakokrake ili pravougle), u euklidskoj geometriji dio su jedinstvenog sistema, u kome se jedna figura može određenim postupcima svesti na drugu preko elemenata koji su definirani jedinstvenim zakonitostima.

Geometrijska tijela izlaze iz okvira euklidske ravnine, u složeniju dimenziju prostora, koji je u euklidskoj geometriji trodimenzionalan. U Euklidovim "Elementima" zadnja tri poglavlja - XI, XII i XIII, posvećena su trodimenzionalnim geometrijskim tijelima, njihovim mjerama i konstrukciji.

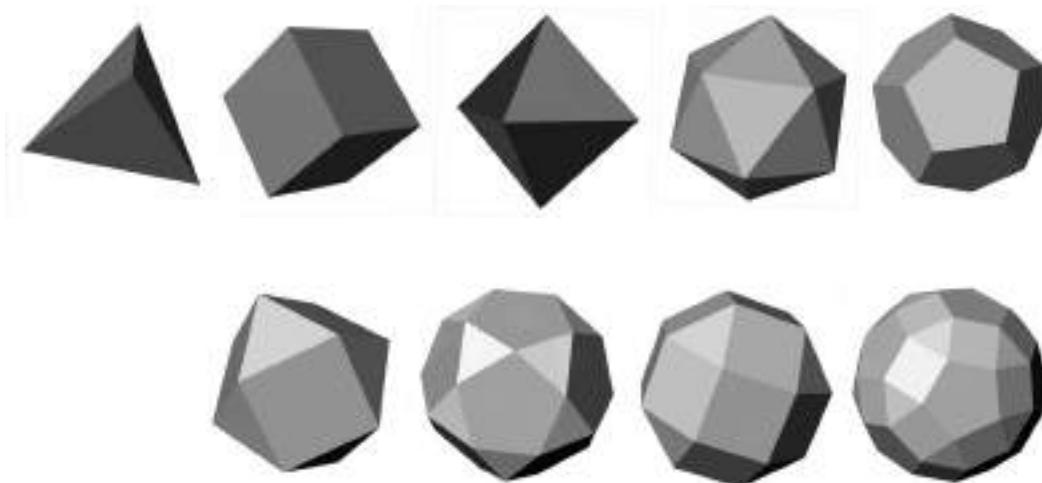
Trodimenzionalnost geometrijskih tijela je definirana kao odnos dužina, širina i dubina (visina), mjernih veličina koje se protežu u tri različita smjera, vezanih uz kvantitet volumena, kao njihove trodimenzionalne mjerne odrednice. Euklidovim definicijama geometrijska tijela su ograničena površinama. Date su i definicije geometrijskih tijela - piramide, prizme, lopte, kupe i valjka, kao i definicije tijela koja pokazuju posebnu pravilnost: tetraedra, kocke, oktaedra, ikosaedra i dodekaedra.¹⁴

Osnovna pravilna geometrijska tijela sa jednakim ivicama i pravilnim poligonalnim stranicama nazvana Platonskim tijelima su:

- Tetraedar - prostorno tijelo obuhvaćeno sa tri jednakata istostrana trougla,
- Kocka - prostorno tijelo obuhvaćeno sa šest jednakih kvadrata,
- Oktaedar - prostorno tijelo obuhvaćeno sa osam jednakih i istostranih trouglova,
- Ikosaedar - prostorno tijelo obuhvaćeno sa dvadeset jednakih i istostranih trouglova,
- Dodekaedar - prostorno tijelo obuhvaćeno sa dvanaest jednakih, istostranih i jednakougljih petouglova.

¹⁴ Euklid, A. Bilimović, *Euklidovi elementi*. Naučna knjiga, Beograd, 1949.

Iz osnovnih pravilnih geometrijskih tijela određenim operacijama kombiniranja i isjecanja moguće je izvesti niz geometrijskih tijela koja se odlikuju određenom geometrijskom pravilnosti, kao što su tzv. Arhimedova tijela. Uz njih se kao pravilna tijela svrstavaju i nekonveksni pravilni poliedri, te zatim daljim isjecanjima pojedinih površina kompleksniji poliedri, npr. zvjezdastog tipa i drugi.



Slika 12.
Pravilna geometrijska tijela.
Platonska i Arhimedova tijela.

2.2. GEOMETRIJSKE MJERE, OMJERI I PROPORCIJE

Mjerenje je postupak koji je još od drevnih civilizacija predstavljao pokušaj uspostavljanja jedinstva kroz stabilnu i nekontradiktornu vrijednosnu skalu koja služi kao referenca u postupku upoređivanja različitih prostornih objekata i njihovih prostornih i vremenskih odnosa. Pojam mjere povezan je uz pojam kvantiteta, kao jedne od osnovnih apstraktnih kategorija. Po Aristotelu¹⁵ kvantitet nema suprotnosti i varijacije, za razliku od kvaliteta koji može imati varijabilne i kontradiktorne vrijednosti.

Mjerenje kao definiranje kvantitativne vrijednosti prostornih formi usko je vezano za nastanak i razvoj geometrije. Najraniji tragovi mjerena nađeni su u ostacima drevnih Babilonskih i Egipatskih kultura, pokazujući razvijene pojmovne sisteme mjera, kao i mjernih modula zasnovanih na veličinama dijelova ljudskog tijela, odnosno ruke, šake i prstiju.

Komparacija prostornih veličina predstavlja osnovu postupka mjerena. Klasična euklidska geometrija bavi se mjernim osobinama prostornih objekata kao što su dužina, ugao, površina i volumen. Prostorne relacije klasične euklidske geometrije ostaju nepromjenjive kroz određene prostorne i vremenske intervale. Nepromjenjivost osnovnih prostornih geometrijskih objekata i njihovih elemenata temeljem je komparacije veličina.

¹⁵ Aristotle, *The Categories*. Translator: E. M. Edghill, The Project Gutenberg EBook, 2000.

Odnos dužine, obima i površine imao je i ekonomski dimenzije, a trebalo je određeno znanje da bi se odnos dužina i površina geometrijski definiranih prostornih oblasti doveo u odgovarajuće korelacije. Da površine i obimi nisu u relaciji koja je intuitivna i ne zasnivaju se na aditivnom kombinovanju, otkriveno je još u starim civilizacijama Babilona i Egipta. U nekim historijskim dokumentima navode se česte greške u direktnom povezivanju obima i površine, što govori o potrebi razvijanja sistema mjerena koji bi nadilazio intuitivne predstave o odnosa veličina i uspostavio egzaktne i univerzalne relacijske odnose.¹⁶

2.2.1. Geometrijski mjerni sistemi

Mjerenje u svome osnovnom obliku može biti relativni odnos dvije veličine, ali napredniji sistemi mjerena su izraženi odnosom neke veličine sa zadanim i definiranim modulom iste vrste, kao mernom jedinicom, što mjerenu daje univerzalniji karakter.

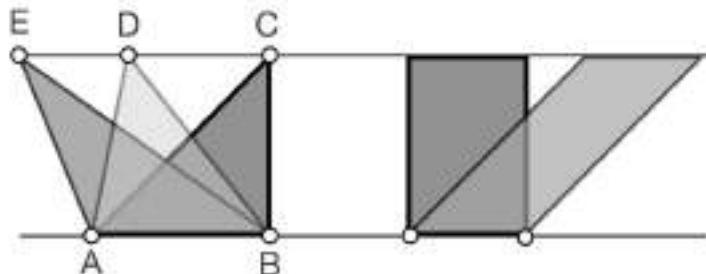
Mjerenje je proces koji determinira odnose dvije ili više veličina razvijajući se u sve složenije nivoje kao:

- Jednakost veličina,
- Odnos manje - veće,
- Razmjera veličina kao relacijski odnos manjeg prema većem i proporcionalni sistem razmjere veličina za određene parove veličina,
- Utvrđivanje konstantnog koeficijenta skale sličnosti koji se prenosi kroz sistem veličina, determinirajući modul koji postaje osnovom mjerena.

¹⁶ Činjenica da na primjer od svih četverouglova kvadrat ima najveću površinu u odnosu na obim, imala je i svoje konkretnе просторне posljedice. U Mario, Livio. *The Equation That Couldn't Be Solved: How Mathematical Genius Discovered the Language of Symmetry*. Simon & Schuster, New York, 2006, p. 56.

Treba naglasiti da se geometrijsko mjerjenje veličina ne može svesti samo na aritmetički izražen broj. Aristotel dijeli kvantitete na diskretne (odvojene), predstavljene brojevima, i kontinuirane, predstavljene geometrijskim elementima - linijama i površinama, vremenom i prostorom. Isto tako razlikuje eksterne kvantitete izražene relativnim, eksternim međusobnim odnosima objekata, i unutarnje, izražene odnosima dijela i cjeline. Po Aristotelovoj definiciji, kvantitet se može izraziti sa dvije determinante: jednako i nejednako.¹⁷

Jednakost se u euklidskoj geometriji uspostavlja kao osnova mjerjenja. Aksiomi koji su utvrđeni na početku euklidskih Elemenata, odnose se na određenje pojma i uslova jednakosti dvije veličine i imaju generalni karakter.



Slika 13.

Jednakost površina geometrijskih figura:
Euclid, Elementi, Knjiga I,

Ilustracija Prop. 35. i 37.

Trouglovi nad istom bazom (AB) čiji vrhovi leže na istoj paraleli, jednaki su.

Paralelogrami nad istom bazom čije gornje baze leže na istoj paraleleli jednaki su (imaju jednake površine).

¹⁷ Aristotle, *The Categories*. Translator: E. M. Edghill, The Project Gutenberg EBook, 2000.

Princip mjerenja u klasičnoj grčkoj geometriji bio je relativnog karaktera, bilo kao eksterni odnos veličina dva objekta geometrije i njihovih elemenata, bilo kao interni međuodnos dijelova neke geometrijske figure ili tijela. Ovakav način mjerenja podrazumijeva utvrđivanje odnosa jednakosti dvije ili više veličina izražene uz pomoć operacija dodavanja, oduzimanja i množenja. Konstruktivni postupak mjerenja je težio uspostavi jasnih odnosa jednakosti. Mjerenje je bilo olakšano poznavanjem pravila međusobnih odnosa elemenata geometrijskih figura.

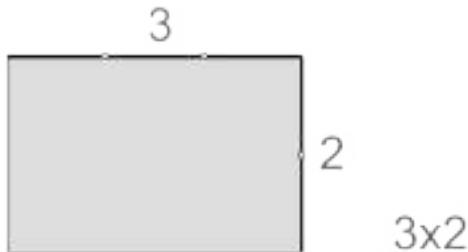
Euklidovim aksiomima utvrđuje se geometrijska jednakost:

- Oni objekti koji su jednaki istom, jednaki su međusobno,
- Ako se jednakim dodaju jednakim, cjeline su jednakе,
- Oni objekti koji se mogu poklopiti, jednaki su međusobno.¹⁸

Osnovni princip mjerenja je upoređivanje veličina i utvrđivanje odnosa jednakog, manje ili veće. U euklidskoj geometriji teži se svođenju geometrijskih figura na one najjednostavnije. Svaka prostorna veličina, npr. površina, može se svesti na linearu veličinu odnosa dužina. Tako se površina u euklidskoj geometriji prikazuje kao odnos veličina dva linearne segmenta određene geometrijske figure. Geometrijski proizvod dvije dužine je jednak površini pravougaonika datih stranica, a svaki pravougaonik mogao se konstruktivnim putem prevesti u kvadrat jednak površine. Trouglovi konstruktivno mogu da se svedu na pravilni četverougaonik, odnosno na pravougaonik, koji se zatim može svesti na kvadrat. Iz jednostavnih konstruktivnih geometrijskih operacija svođenja geometrijskih figura na kvadrat, proistekli su mnogi matematički problemi i razvoj nekih područja matematike (problem kvadrature kruga ili kvadratnih jednačina).

18 Euklid, A. Bilimović, *Euklidovi elementi*. 1949.

Iako je princip mjerenja u euklidskoj geometriji konstruktivno bio jasno razrađen, treba naglasiti da odnosi veličina i mjerenje u klasičnoj grčkoj geometriji nisu direktno vezani za algebarske operacije i broj. Operacijama sabiranja, množenja i dijeljenja u geometrijskom smislu, nisu se samo utvrđivali odnosi linearnih kvantiteta već je npr. operacija množenja dvije istovrsne veličine kao što su linearne dužine, koja se aritmetički može predstaviti linearnim sukcesivnim sabiranjem, u euklidskoj geometriji dobivala kvalitativno prostorno značenje. Geometrijski proizvod dvije dužine daje novu geometrijsku figuru složenijeg reda dimenzije, kao površinu geometrijske figure - pravougaonika ili kvadrata.



Slika 14.

Proizvod dvije linearne veličine u klasičnoj Grčkoj geometriji.

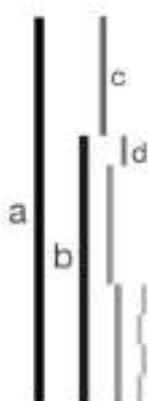
Operacija množenja dvije linearne veličine proizvodi složeniju prostornu dimenziju - površinu geometrijske figure.

Mjerni moduli su se kroz historiju i različite civilizacije mijenjali, da bi danas metrički sistem mjerena geometrijskih veličina postao prevladavajući. Metrički sistem mjerena zasnovan je na hijerarhijskom numeričkom redu veličina na bazi deset, kroz tri nivoa mjera koji obuhvataju različite prostorne dimenzije, za dužinu, površinu i volumen. Savremeni sistem mjerena je standardiziran i povezan sa linearnom brojnom skalom, tako da se mjera i broj čine nerazdvojnim ili identičnim pojmovima. Proces mjerena danas je zasnovan na univerzalnom modularnom principu mjerena, kod koga je određena veličina prihvaćena kao univerzalna mjera, kojom se izražavaju odnosi veličina.

2.2.2. Omjer i proporcija

Ukoliko dvije veličine nisu jednake, utvrđivanje odnosa potrebnog ponavljanja manje veličine da bi se dobila veća, odnosno utvrđivanje relativnog omjera jedne veličine prema drugoj, osnova je principa mjerjenja u klasičnoj euklidskoj geometriji. Direktno upoređivanje dvije veličine predstavlja utvrđivanje njihovog omjera. Omjer veličine predstavlja odnos manje prema većoj, odnosno broj ponavljanja kojom se manja veličina može poklopiti sa većom.

U slučaju da od dvije veličine koje se upoređuju, manja veličina multipliciranjem ne može dati veličinu jednaku većoj, utvrđuje se najmanja zajednička mjera ili najmanji zajednički djelilac, odnosno vrši se uspoređenje dvije veličine sa njihovom razlikom, koja predstavlja modul kojom se dvije veličine mogu izmjeriti, tako da se određenim sukcesivnim ponavljanjem modularne veličine dobiju veličine jednake i manjoj i većoj veličini.



Slika 15.

Omjer dvije dužine a i b , kao rezultanta ponovljenog postupka traženja zajedničke razlike.

Razlika (c) između dvije dužine koristi kao mjerni modul za manju dužinu (b), a zatim se eventualna nova razlika (d) koristi kao mjerni modul razlike c . Ukoliko se određenim brojem ponavljanja razlika d poklapa sa datom veličinom c , ona predstavlja najmanji zajednički djelilac dužina a i b , jer se sadrži i u dužinama a i b , i u njihovoj razlici c .

Kompleksniji princip omjera veličina je utvrđivanje broja sukcesivnih ponavljanja kojim se jedna i druga veličina mogu dovesti u jednakе veličine, odnosno utvrđivanje najmanjeg zajedničkog sadržaoca dvije veličine.

Omjer i proporcija kao relativan odnos dvije ili više veličina, u klasičnoj euklidskoj geometriji imali su najznačajniju ulogu u definiranju relacijskih mernih odnosa. Omjer je kvantitativna usporedba između dva geometrijska objekta koji pripadaju istoj vrsti. Omjer dvije veličine može se izraziti numerički, kao broj kojim je potrebno multiplicirati jedan element da bi postao jednak drugom.

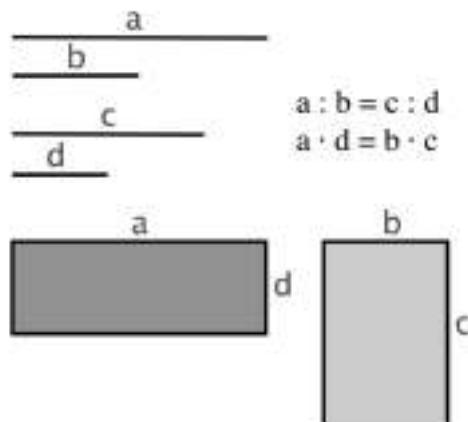
Proporcija je složeniji vid relacija veličina, koji čine dva ili više omjera. Pojam proporcije obuhvata pojmove veličine i mjere, omjera, modula i simetrije. Svoje porijeklo proporcijski sistemi su s jedne strane imali u teoriji muzike a s druge u geometriji i aritmetici. Muzički omjeri povezani su s geometrijom preko omjera dužina na jednostavnim žičanim instrumentima, odnosno geometrijski izraženim odnosima dužine žica i skladnih tonova, pa su se omjeri 2:1, 3:2 i 4:3 koji odgovaraju muzičkoj oktavi, kvinti i kvarti, tretirali i na geometrijski način, posmatrajući ih kao omjere geometrijskih dužina.

U klasičnoj euklidskoj geometriji proporcijiski sistemi su bili podvrgnuti deduktivnoj logici. Euklidska geometrija bavi se univerzalnim proporcijama, koje nisu samo numerički izražene, već se odnose na sve veličine, linije, površine ili neki drugi konkretni kuantitet. Identičnost ili podudarnost elemenata i figura kao primarna kvaliteta neophodna za realiziranje relativne relacijske mjere, u proporcijском sistemu veličina je zamijenjena određenom sličnošću elemenata gdje se omjer dvije veličine u proporcijском sistemu, prenosi kao konstanta kroz niz veličina u uzajamnom odnosu.

Proporcijski odnosi euklidske geometrije, iako utemeljeni na naizgled jednostavnim principima proporcija, otkrili su izuzetnu kompleksnost relacijskih odnosa i najelementarnijih geometrijskih figura. Različite konfiguracije proporcijskih relacija kao što su geometrijska, aritmetička i harmonijska sredina, neki su od karakterističnih proporcijskih odnosa.

2.2.3. Specifični proporcijski odnosi

Predmet mjerjenja Euklidske geometrije su bili odnosi jednakosti i sličnosti ne samo linearnih segmenata već i složenijih geometrijskih figura i njihovih površina. Proporcijski odnosi sa dva omjera geometrijskih veličina mogu se izraziti kao izraz $a:b=c:d$, gdje a, b, c i d predstavljaju različite dužinske veličine. Iako je u najjednostavnijoj formi ova proporcijска relacija predstavljena sa četiri različite dužine linija, proporcija četiri linearne dužine u euklidskoj geometriji može biti predstavljena i sa dva pravougaonika, čije su stranice odgovarajuće linearne dužine.



Slika 16.
Geometrijska proporcija kao odnos stranica
pravougaonika.

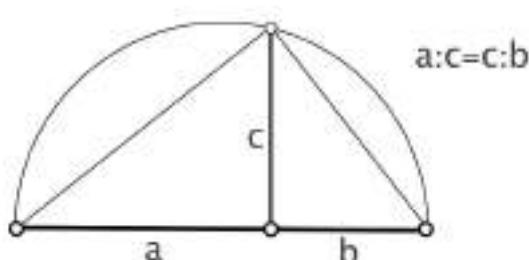
Geometrijska proporcija dužina a, b, c i d , izražena kao odnos linijskih dužina i kao odnos stranica pravougaonika.

Dva pravougaonika stranica ad i bc imaju proporcionalne stranice i jednake površine.

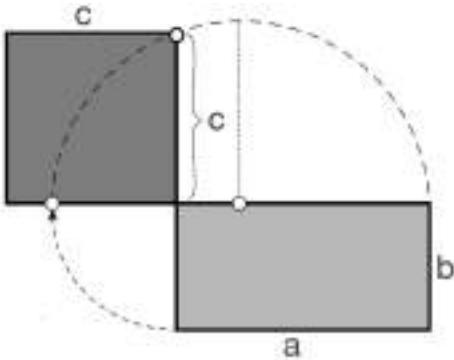
Analogno traženju zajedničkog modula, omjera i proporcije kojim se mogu definirati dvije ili više dužina, površine su izražavane kao omjer stranica, odnosno kao kvadrat koji ima jednaku površinu kao data figura. Svođenje različitih oblika površina na kvadrat bila je jedna od fundamentalnih geometrijskih operacija klasične geometrije. "Kvadriranje" geometrijskih figura je bio osnovni konstruktivni problem euklidske geometrije koji je postao osnova kasnije razvijenih matematičkih algebarskih funkcija.

Svođenje geometrijskih figura na pravougaonike, a zatim konstruktivno prevođenje pravougaonika u kvadrate, predstavljalo je u klasičnoj euklidskoj geometriji osnovu mjerena površina geometrijskih figura. "Kvadriranje" pravougaonika je identično traženju posebnog proporcionalnog odnosa stranica pravougaonika i analognog kvadrata. Za ovaj proporcionalni odnos u euklidskoj geometriji koristio se naziv srednja proporcija.

Srednja proporcija ima tri člana od kojih jedan u matematskom izrazu predstavlja geometrijsku sredinu dvije veličine. Ovakav proporcionalni odnos se može izraziti kao proporcija $a:c=c:b$. Ova proporcija izražava odnos pravougaonika stranica ab i kvadrata iste površine čija je stranica veličina c.



*Slika 17.
Konstruktivni postupak određivanja
geometrijske sredine dvije dužine.
Proporcija $a:c=c:b$*



Slika 18.

Srednja geometrijska proporcija pravougaonika - kvadratura pravougaonika.

Srednja geometrijska proporcija stranica pravougaonika a i b , daje dužinu stranice c kvadrata koji ima istu površinu kao dati pravougaonik.

$$a:c=c:b \quad ab=c^2$$

Omjeri i proporcije kao princip određivanja relativnih odnosa različitih veličina, imali su za cilj određivanje zajedničkog modula kojim su obje veličine mogle biti definirane, postupcima multipliciranja. Ovaj modul mogla je biti manja veličina ili neki dio ovih veličina koji se multipliciranjem mogao sadržavati u obje veličine.

2.2.4. Iracionalne veličine i zlatni rez

U geometriji se otkrivaju i takvi omjeri veličina koji se ne mogu svesti na jednu zajedničku mjeru kao racionalni broj. Kod utvrđivanja mjernog odnosa proporcije stranica kvadrata sa njegovom dijagonalom, utvrđeno je da je ovaj odnos teoretski nesumjerljiv cijelim brojem, odnosno da nije moguće konstruktivno naći dio koji se cijelim brojem multipliciranja može svesti na obje veličine.

Da bi se prevazišla nesumjerljivost linearnih veličina brojem, euklidska geometrija koristi odnose omjera i konstruktivne postupke koji brojeve zamjenjuju omjerima i proporcijama u složenijim hijerarhijski definiranim prostornim dimenzijama.

Otkriće nesumjerljivosti određenih veličina povod je usmjeravanju mjernih odnosa ka geometrijskim rješenjima, gdje su iracionalni mjerni odnosi u nekim slučajevima prevaziđeni pomoću konstruktivnog prevođenja dužina u površine, kao što je slučaj sa odnosom dijagonale kvadrata prema njegovoj stranici, koji se relacijski može izraziti kvadratima njihovih veličina. Iako je mjerni numerički odnos dijagonale i stranice kvadrata teoretski nemoguće izraziti racionalnim brojem, konstruktivni aspekti omjera dijagonale i stranice kvadrata su izraženi jasnim odnosom njihovih kvadrata, što je jedan od fundamentalnih teorema euklidske geometrije.

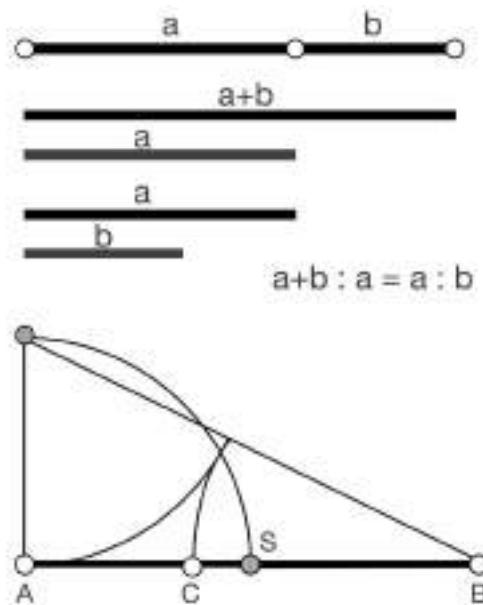
Nekim omjerima i proporcijama koje se ne mogu predstaviti racionalnim brojem, pridavane su često mistične kvalitete, kao što je poseban oblik geometrijske proporcije koja se u euklidskoj geometriji naziva proporcija u ekstremnom i srednjem odnosu, poznata i pod nazivom "zlatni presjek" ili "zlatni rez". Ova proporcija ima složenu strukturu i manifestira se na više načina. Osnovni princip je ponavljajuća skalirajuća proporcija koja se može odnositi na omjer dužina, ali isto tako i na omjer površina.

Proporcija "zlatnog reza" ima rekurzivan, povratni karakter i može se izraziti kako geometrijski tako i algebarski. Matematički se uglavnom ova proporcija tretira algebarski, s naglaskom na njenom numeričkom izrazu kao vrijednosti koja se označava sa grčkim slovom ϕ , a njena brojčana vrijednost je iracionalni broj, sa beskonačnim brojem decimala (približno 1,6180339887....).

U geometrijskom smislu ova proporcija je predstavljena podjelom duži na dva dijela u međusobnom odnosu kojim su oba povezani i sa cjelinom a i međusobno. Odnosi među dijelovima i cjelinom u ovakvoj proporciji zasnivaju se na principu koji se ne može iskazati jednostavnom brojnom relacijom.

Geometrijski izraz ove proporcije u Euklidskim Elementima dat je u propoziciji kojom se utvrđuje način podjele neke dužine na dva dijela, tako da je omjer cijele dužine i većeg dijela jednak omjeru većeg dijela prema manjem.¹⁹

Ako dva dijela duži označimo sa a i b, izraz za proporciju u ekstremnom i srednjem odnosu, tzv. zlatni rez je $a+b : a = a : b$.



Slika 19.

Geometrijska konstrukcija podjele duži u proporciji "zlatnog reza".

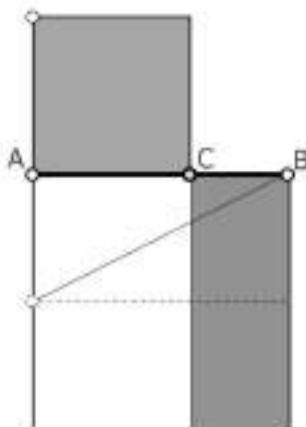
Zlatni rez predstavlja podjelu dužine na dva dijela, tako da je omjer zbiru dvije dužine i većeg dijela jednak omjeru većeg dijela prema manjem.

$$AB:CB = CB:AC$$

¹⁹ Euklid, A. Bilimović, *Euklidovi elementi*. 1949. Propozicija 30, poglavlje VI

Kada manju od dvije dužine proporcije uzmemo kao jedinicu, dobiva se pojednostavljen izraz $a+1 : a = a : 1$, odnosno izraz $a+1=a^2$, gdje je vrijednost veličine a jednaka broju ϕ .

U euklidskoj geometriji podjela duži po iracionalnoj proporciji "zlatnog reza" je predstavljena i podjelom duži tako da je pravougaonik nad cijelom duži i jednim odsječkom, jednak kvadratu nad drugim odsječkom.²⁰

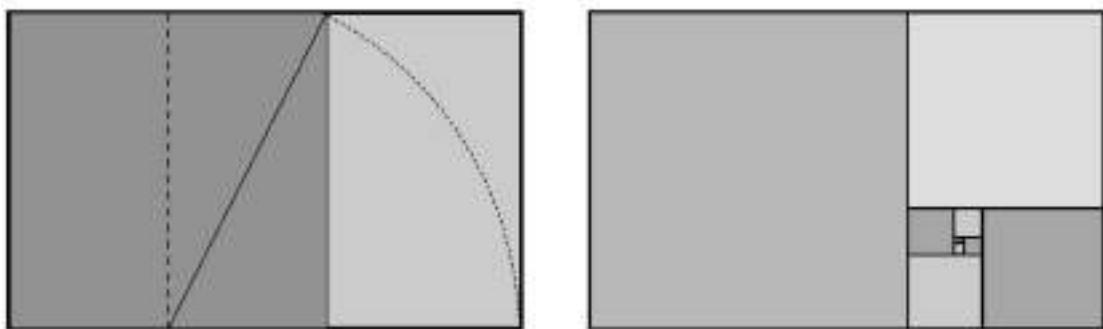


Slika 20.

*Ilustracija proporcije u ekstremnom i srednjem presjeku "zlatnog reza", kao odnos površine pravougaonika i kvadra:
Datu duž podijeliti tako da pravougaonik nad cijelom duži i jednim odsječkom bude jednak kvadratu na drugom odsječku.*

Omjer dvije dužine koji predstavlja proporciju u euklidskom ekstremnom i srednjem presjeku, odnosno "zlatnom rezu", može se predstaviti i u vidu pravougaonika čije su stranice u ovom omjeru, čime je dobiven "zlatni pravougaonik". Kada se od cijelog pravougaonika oduzme kvadrat kraće stranice, preostali pravougaonik je u istom omjeru stranica. Postupak se može beskonačno ponavljati, zadržavajući isti omjer stranica.

²⁰ Ibid. Poglavlje II, propozicija 11.

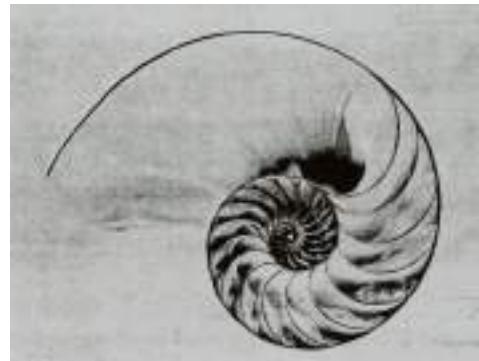
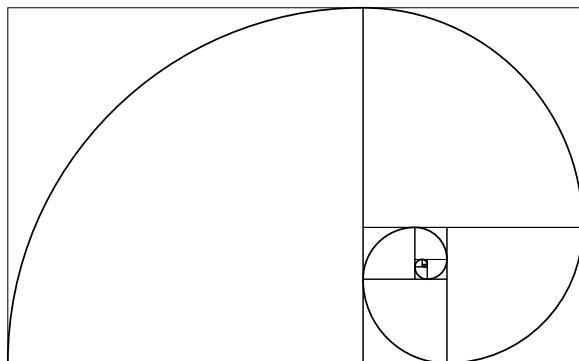


*Slika 21.
Konstrukcija pravougaonika čije su stranice u omjeru "zlatnog reza".*

Algebarski je u modernoj geometriji definirana čitava "porodica" iracionalnih brojeva analognih zlatnom rezu, tako da je proporcija zlatnog reza ipak samo najjednostavniji oblik jedne generalne strukture iracionalnih rekurzivnih proporcijskih relacija. Ono zbog čega je ova proporcija interesantna kao primjer, je to što iz pojednostavljenja na jednom apstraktном nivou, proizilaze često najkompleksnije strukture, što je kako u geometriji, tako i u matematici i ostalim naukama evidentno kroz čitav njihov razvoj.

Mistični karakter koji se pripisuje iracionalnoj proporciji u ekstremnom i srednjem omjeru, "zlatnom rezu", rezultat je apstrahovane jednostavnosti koja rezultira kompleksnošću manifestacija ovog omjera, kako u algebarskim tako i geometrijskim strukturama. Proporcija zlatnog reza nije toliko misteriozna, već se mora posmatrati u jednom širem generalnom kontekstu euklidske geometrije i specifičnog načina mjerena, koji se ne može izjednačiti sa savremenim univerzalnim postupkom mjerena ni geometrijskom mjerom u kartezijanskom sistemu numeričkih koordinata.

Proporcija "zlatnog reza" vezana za generaliziran sistem usporedbe dvije veličine i traženja najvećeg zajedničkog djelioca ili sadržioca dviju dužina, sukcesivnim oduzimanjem, dodavanjem i množenjem, samo je pojednostavljen oblik proporcije geometrijske sredine, gdje je treći član proporcije zamijenjen sa zbirom ostala dva člana proporcije. Ona pokazuje da se i relacijom jednostavnih konačnih elemenata mogu stvoriti mnogo složeniji, pa i beskonačni prostorni kvaliteti i kvantiteti. Takozvani Euklidski algoritam, jednostavna konstruktivna geometrijska operacija relativnog mjerjenja dvije dužine, bez unaprijed zadanoj univerzalnog modula - jedinice i geometrijska proporcija čiji je najjednostavniji i najuniverzalniji oblik proporcija "zlatnog reza", načini su mjerjenja odnosa veličina koji nisu zasnovani na unaprijed zadanoj numerički determiniranoj mjernoj skali i jedinici mjerjenja, već je mjerna jedinica relativna skalirajuća veličina. Mjerjenje u geometriji može imati dinamički karakter koji nadilazi statične prostorne relacije. Racionalno i iracionalno, konačno i beskonačno u geometriji su povezani u jedinstven prostorni sistem.



Slika 22.
Aproksimacija spirale u omjeru "zlatnog reza":
Fibonačijeva spirala i njena manifestacija u prirodnom svijetu kao Nautilus školjka.

3

DINAMIČKI GEOMETRIJSKI KONCEPTI

Pojam statičnog i dinamičnog rezultat je konstitucionalne dvosmislenosti koja je posljedica principa komplementarnosti kao načina opisivanja prirodnih pojava. Nasuprot pojmu statičnog, koji označava nepromjenjivost, postojanost i stabilnost, pojam dinamičkog veže se uz nestabilnost i promjenu. Pojam dinamike označava svojstvo i moć promjene i prelaska u drugo stanje. U prostornom smislu statičnost označava nepokretnost i postojanost oblika i unutarnje strukture nekog prostornog objekta ili sistema, dok je dinamičnost vezana uz promjenu relacijskih odnosa objekta i njegove okoline ili njegovih unutarnjih relacijskih odnosa između dijelova, što se manifestira kao kretanje ili transformacija njegovog oblika i strukture.

Princip komplementarnosti u opisivanju prirodnih pojava javlja se još u antičkoj filozofiji. Idealne platoske forme kao apstraktne strukture i prirodni oblici postavljeni su jedni naspram drugih, prvi kao nepromjenjivi, drugi kao dinamični, promjenjivi i nestabilni. Nasuprot apstraktnim, vječnim geometrijskom formama, materijalni, čulni oblici podložni su kompleksnim strukturnim transformacijama, kao što su nastanak, rast, razvoj i razgradnja.

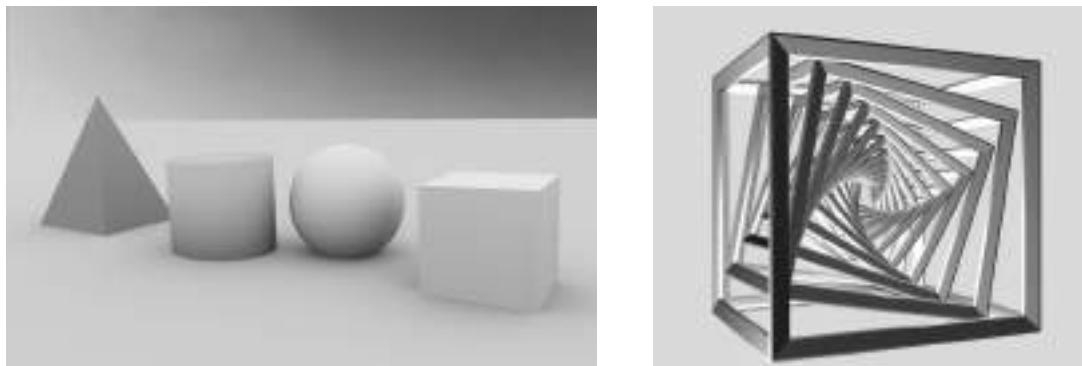
3.1. STATIČNI I DINAMIČKI ASPEKTI GEOMETRIJE

Klasična euklidska geometrija često je tumačena kao nauka o postojanim i vječnim prostornim figurama i njihovim relacijama. Ova tumačenja temelje se na stavu da je geometrija zasnovana na svijetu idealnih bezvremenih prostornih formi. Apstrakcija i nepromjenjivost temeljnih geometrijskih struktura vežu se uz stabilnost i trajnost Platonskog svijeta ideja, nasuprot svakovrsnoj promjeni kojoj je podložan konkretni, realni prirodni prostor. Geometrijska forma, u klasičnom platonističkom tumačenju, nasuprot promjenjivom svijetu, predstavlja idealno ravnotežno stanje u kome neka prostorna struktura egzistira u bezvremenoj inerciji, kao apstraktna nepromjenjiva forma. Geometrijske forme utjelovljuju postojanost u stalno promjenjivoj stvarnosti. Intuitivno otkrivši zakone koji reguliraju stabilnost materije, u principima geometrije ovi zakoni realiziraju se u idealnim geometrijskim formama. Stabilni i stalni oblici u kojima se materija iskazuje u idealnom, ravnotežnom stanju, odnose se prije svega na materiju u čvrstom stanju. Pravilni geometrijski likovi nisu samo proizvod apstraktnih šema ljudskog uma, što je eksperimentalno potvrdila moderna atomistika.

Klasično tumačenje geometrije zasniva se na tezi da zakoni euklidske geometrije uređuju položaje krutih tijela. Stabilne i statične forme predstavljaju sisteme u idealnom, ravnotežnom stanju, u kome nije moguća promjena bez nekog jakog spoljašnjeg utjecaja. Statičan geometrijski model utvrđuje nepromjenjivost prostornih struktura i konstantnost relacionih odnosa te time i konstantnost forme, odnosno prostornih oblika.

Statičan i nepromjenjiv model svijeta, a s njim i prostora, ni u kom slučaju ne može biti dovoljan da bi opisao složene fenomene prirodnog svijeta. Ulogu kretanja i promjene, kao osnovnog principa koji prožima cijeli svijet, uvidjeli su mnogi drevni mislioci kao što su Heraklit i Aristotel. Umjesto zatvorene, statične strukture postepeno se razvijaju dinamičke kvalitete geometrijskog prostora.

Razdvojenošću vidova statičnog i dinamičkog razdvojeni su forma i kretanje, stanje i proces, forma i prostor. Iz ovakve predstave potiču pojednostavljena tumačenja prostora kao praznine ispunjene tijelima (materijalnim oblicima) ili prostora kao korelacionog svojstva konkretnih materijalnih oblika. I jedno i drugo tumačenje svoj odraz nalaze u geometriji, kao modelu koji predstavlja mase i veličine formi u praznom prostoru, odnosno njihove relacione odnose. Ovakva klasična predstava prostora održala se sve do savremenog doba i često se može naći u uobičajenim predodžbama u kojima se očitavaju fenomeni prostora, kako u nauci i tehnici tako i u kulturi i umjetnosti.



Slika 23.
Statične i dinamičke geometrijske forme.

3.1.1. Dinamički aspekti geometrije

U prirodnom, fizičkom svijetu, čvrste materijalne strukture, iako posjeduju stabilan oblik, nisu nepromjenjive, jer su dio sistema koji nije statičan, već dinamičan. Prirodne forme podložne su dinamičkim procesima koji utiču na njihovu strukturu i oblik. Nestalnost i nestabilnost prirodnih oblika nije bilo moguće obuhvatiti jednostavnim apstraktnim analitičkim modelima, pa su u klasičnoj nauci mnogi čulni prirodni fenomeni ostali u domenu iracionalnog, intuitivnog, osjetilnog i emotivnog.

Aristotelova filozofska škola, čiji se utjecaj u nauci ocrtava u uvođenju eksperimenta kao čulne potvrde određenih logički utvrđenih zakonitosti, naglašava značaj aktivnog potencijalnog principa koji prožima prirodni svijet. "Dynamis" kao pojam koji predstavlja ovaj princip, označava počelo kretanja, kojim je uslovljeno postojanje materije.

Opažanje dinamičkog karaktera okružujućeg svijeta oduvijek se suprotstavljalo idealnoj slici nepromjenjivosti i stabilnosti. Dinamika je pojam koji razvojem nauke dobiva sve složeniju prirodu, pa od jednostavnog, linearog kretanja, kao promjene položaja, obuhvata i sve složenija kretanja i promjene materijalnih sistema, uključujući termodinamiku koja opisuje promjene veličine (širenja) ili oblika (topljenje, smrzavanje), do topoloških deformacija i kvantnih dinamičkih fenomena. Dinamika je u geometriji vezana uz kvalitativne promjene koje prostoru daju dimenzionalnost i morfološke potencijale.

Pojam prostora proistekao je iz vizualnih, taktilnih i kinetičkih utisaka i iskustava, i kao takav determiniran je statičnim i dinamičkim kvalitetama. Poincare smatra da nepokretno biće ne može nikada steći pojam o prostoru, kao i da bez čvrstih tijela u prirodi ne bi bilo geometrije. Zakoni pomjeranja tijela u prostoru su po njemu izvorni objekt geometrije.²¹

Geometrija starih civilizacija nije bila primjenjivana samo da izmjeri, označi i utvrdi stabilne nepromjenjive prostorne odnose i oblike, već i da opiše, izmjeri i definira neka uočena kretanja, kao što su kretanja nebeskih tijela. Astronomске šeme proistekle iz praćenja ovih kretanja, predstavljale su ishodište važnih geometrijskih otkrića i isto tako zahtijevale temeljno poznavanje geometrije. Često se područje primjene geometrije vezane za dinamičke kozmološke aspekte, u istoriji nauke ne potencira dovoljno, naglašavajući metričku ulogu "mjerenja zemljine površine", fiksirajući je kroz kvantitativne relacijske odnose uz ravnu površinu tla i nepokretne objekte kao što su gradbene strukture.



Slika 24.

Sunčani sat u Apolonovom hramu, Pompeji.

Konstrukcija sunčanih satova u drevnim kulturama zahtijevala je poznavanje geometrije koja uključuje dinamička svojstva prostora, povezujući prostor i vrijeme, geometriju i astronomiju.

²¹ Henri, Poincare. *Science and Hypothesis*. The Walter Scott Publishing, New York, 1905. pp. 69-71.

Klasičan euklidski geometrijski sistem utvrđuje konstantnost relacionih prostornih odnosa osnovnih prostornih elemenata, tačke i pravca, koji tvore geometrijske strukture višeg reda.

U definicijama osnovnih geometrijskih elemenata Euklid²² navodi:

- Tačka je ono što nema dijelove (dimenzije),
- Linija je dužina bez širine,
- Krajevi linije su tačke.

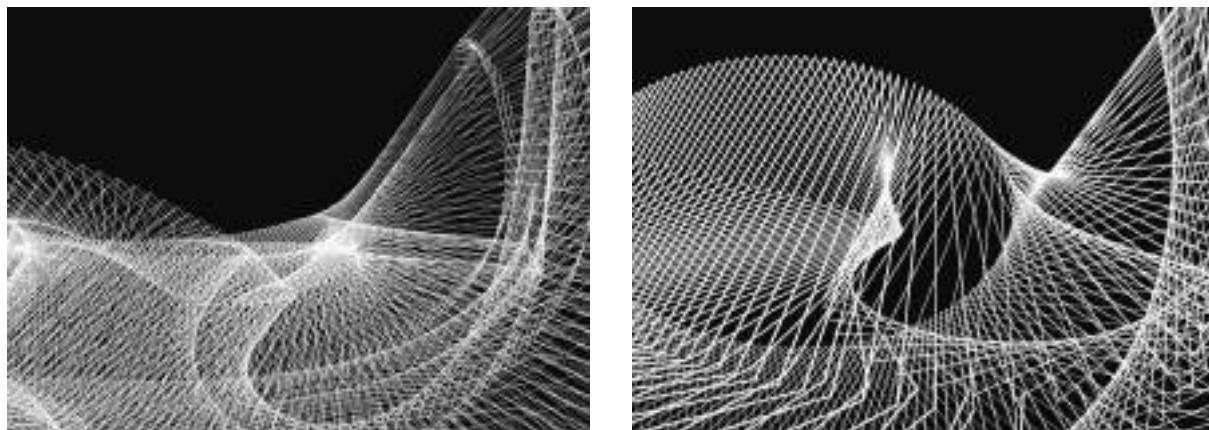
Mnoge je teoretičare dovodila u nedoumicu definicija tačke kao neprostornog elementa, koja limitira i definira ostale prostorne elemente. Ove nedoumice bile su posljedica kvantitativnog pristupa geometriji. Geometrija koja ne počiva samo na kvantitativnim, već je utemeljena i na kvalitativnim karakteristikama prostora, uključuje kretanje i dinamiku kao jedan od kvalitativnih realiteta prostornosti.²³

U dinamičkom geometrijskom modelu geometrijski elementi nisu definirani kao aditivne komponente, već kao potencijalni modusi kretanja. Osnovni elementi, tačka i linija, predstavljaju korespondentnu sliku dva osnovna prostorna modaliteta - mirovanja i kretanja. Tačka predstavlja bilo kakav entitet u mirovanju i u tom smislu možemo tačku nazvati neprostornom a realnom. Linija je kontinuirani dinamični entitet, koji predstavlja trag kontinuiranog kretanja tačke na nekom višem referentnom prostornom nivou - površini. Drugi prostorni nivo kretanja je površina, a ravan je idealna forma površine, strukturno determinirana kao putanja pravca u kretanju. Treći prostorni nivo kretanja je najviši nivo u okviru trodimenzionalnog geometrijskog modela, determiniran kretanjem ravni.

²² Euklid, A. Bilimović. *Euklidovi elementi*. 1949.

²³ Još u radovima Ruđera Boškovića uvodi se u geometriju pojam kretanja, pa je geometrijski pravac predstavljen kretanjem neprotežne materijalne tačke, Branko, Pavlović. *Filozofija prirode*. 1978. pp. 166-170.

Sva kretanja u dinamički definiranom geometrijskom modelu su kontinuirana u okviru jednog određenog nivoa. Ovi nivoi kretanja odgovaraju pojmu dimenzije. Dinamički kvalitet osnovnih geometrijskih elemenata kao što su linije i površine, daju geometrijskom prostoru potencijale transformabilnog medija koji nije samo neutralna pozadina.



Slika 25.

Geometrija dinamičke forme nastale kretanjem pravca po određenim zakonitostima.

U euklidskoj geometriji jedan od glavnih principa, princip jednakosti geometrijskih figura, uključuje pokretanje figura kojom se ove figure poklapaju, čime se utvrđuje njihova jednakost. Figure kretanjem mijenjaju svoj položaj ali zadržavaju neka invarijantna²⁴ struktura svojstva. Invarijantnost i promjena su dva pojma koja su povezana uz pojam dinamike u geometriji.

²⁴ Invarijantnost u geometriji označava nepromjenjivost nekih svojstava, kao što su mjerne veličine dužina, uglova, ali može uključiti i neka druga struktura svojstva.

Geometrijska mjera ima takođe svoje statične i dinamičke aspekte, koji se međusobno prepliću na različitim nivoima mjerjenja. Jedinična apsolutna metrička mjera je određena kao statična prostorna struktura, nepromjenjiva i univerzalna u bilo kakvom prostornom sistemu. Relativna prostorna mjera promjenjiva je u odnosu na apsolutnu, a njena stabilnost određena je kao proporcionalna relacija dvije ili više prostornih struktura.

Proporcionalni mjerni sistemi koji obuhvataju i iracionalne omjere složenijeg su karaktera od apsolutnog mjernog sistema fiksnih veličina. Jedinična relativna mjera je različitih apsolutnih veličina za svaki pojedinačni prostorni sistem i kao takva predstavlja dinamičnu, skalirajuću strukturu. Ovakav način mjerjenja predstavlja osnovu složenih proporcionalnih sistema, koji u strukturu prostornih veličina - dimenzija, uvodi dinamičke kvalitete. Tako možemo govoriti o dinamičkom sistemu mjeri ili o dinamičkoj proporciji. Dinamički sistem proporcija primjenjuje se kroz više različitih strukturnih nivoa, obuhvatajući različite prostorne nivoe složenosti kao jedinstvenu cjelinu, uključujući skalirajuće veličine, dozvoljavajući njihovu promjenu. Relativni, dinamički mjerni sistemi karakteristika su i nekih starijih kultura, a i savremenih matematičkih i fizikalnih sistema, kao što su npr. fraktalne geometrijske strukture.



Slika 26.
Dinamički sistem proporcija primijenjen kroz više prostornih nivoa.
Fraktalna geometrijska forma.

3. 2. GEOMETRIJSKE TRANSFORMACIJE

Geometrijske transformacije postaju najbitnijom odrednicom savremenih geometrijskih koncepata i modela prostora. Uz deduktivnu metodu i aksiomatsku zasnovanost geometrije, fundamentalna generalna ideja geometrije je geometrijska transformacija, koja postaje baza daljeg razvoja geometrije kroz teoriju grupa.²⁵ Svaka geometrijska figura, kao složenija prostorna geometrijska struktura, u dinamički koncipiranom geometrijskom prostornom modelu ima mogućnost kretanja i promjene - transformacije. Dinamički geometrijski koncepti obuhvataju sve vrste transformacija kojim jedna geometrijska forma može biti preobražena tako da se zadržava njena struktorna jedinstvenost.

U klasičnom euklidskom geometrijskom modelu kao dinamičkom modelu, obuhvaćene su samo kontinuirane transformacije koje zadržavaju određenu metričku strukturu geometrijskih figura, dok u savremenoj geometriji transformacije obuhvataju daleko šire i generalnije značenje.

Koncept transformacije jedan je od osnovnih koncepata u savremenoj geometriji. Iako pojam transformacije u klasičnoj euklidskoj geometriji nije bio sistemski uključen u deduktivnu strukturu ove geometrije, euklidska geometrija smatra se najelementarnijom geometrijom unutar hijerarhijske strukture geometrija definiranih određenim grupama transformacija.

²⁵ I. M. Yaglom. *Geometric Transformations I*. The Mathematical Association of America, 1975. p. 5.

U euklidskoj geometriji sintetički primijenjenim transformacijama su rješavani metrički problemi, npr. utvrđivane su jednakosti figura njihovim pomicanjem i poklapanjem, a površine geometrijskih figura pretvarane su u pravougaonike i kvadrate jednake površine. Konstruktivna metoda transformacije u euklidskoj geometriji nije generalizirana, iako se u njoj mogu naći osnovni tipovi transformacija koje su u geometriji sistematizirane u kasnijim periodima razvoja matematike i geometrije.

Geometrijske transformacije sistemski su definirane tek u 19. stoljeću. Matematičar Felix Klein je 1872. g. definirao geometriju kao nauku koja proučava svojstva prostora koja su invarijantna (nepromijenjena) pod nekom datom grupom transformacija.²⁶ Time su otkrića tzv. neeuklidskih geometrija koje su bile u koliziji s euklidskom geometrijom dobila sistemsku podlogu, objedinjujući različite "tipove" geometrija u jedinstvenu hijerarhijsku strukturu, pružajući unificiran sistemski pristup modernoj geometriji.

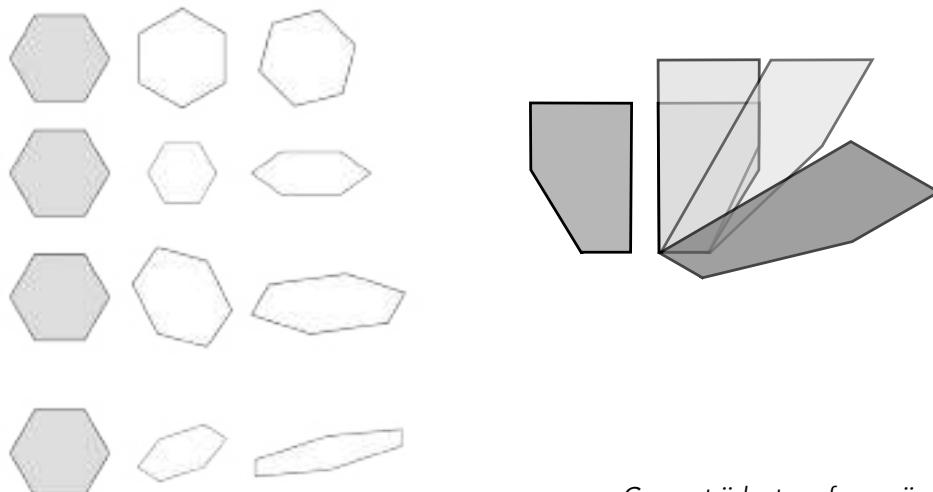
Transformacija predstavlja strukturnu reorganizaciju koja znači preobrazbu neke geometrijske prostorne figure, zadržavajući određena relaciona svojstva. Jedinstvenost geometrijske forme podrazumijeva njenu jedinstvenost kroz preobrazbe, tako da se osnovna struktura na određen način održava u kontinuitetu relacionih odnosa. Geometrija po savremenim definicijama predstavlja skup zakona koji definiraju i povezuju ove relacione odnose u jedinstvenu cjelinu.

Koncept geometrijske transformacije usko je vezan za koncept preslikavanja i projekcije. Geometrijske projekcije obuhvataju razne vrste preslikavanja geometrijskih figura, ne samo u ravni, već i složenije projekcije s krive površine na ravan ili s ravni na krivu površinu.

²⁶ Felix, Klein. A comparative review of recent researches in geometry, Bull. New York Math. Soc. 2, 1892-1893. pp. 215-249.

Projekcijom se uspostavlja korespondencija dvije geometrijske figure. U savremenoj geometriji klasični pojam geometrijske figure generaliziran je u pojam grupe geometrijskih objekata.

Geometrijske transformacije, kao posljedica preslikavanja neke geometrijske figure odnosno geometrijskog objekta, mogu biti povezane, tako da ishod jedne transformacije postaje polazište nove transformacije. Transformacije mogu biti kombinirane u neku složeniju prostornu kompoziciju istovrsnih ili različitih vrsta preslikavanja. Rezultanta kompozicije transformacija može se tretirati kao jedinstvena nova transformacijska cijelina.²⁷



Slika 27.
Geometrijske transformacije u ravni i kompozicija
geometrijskih transformacija.

²⁷ Ibid. pp. 215-249.

3.2.1. Transformacije podudarnosti

Matematsko-geometrijski prostorni model zasnovan je na apstrahovanju prostornih elemenata kao idealnih struktura, stabilnog karaktera. Prostorne relacije koje determiniraju objekte geometrije su: pripadnost, poredak i geometrijska jednakost - kongruencija (podudarnost figura). Pojmom geometrijske jednakosti uslovljen je postupak mjerenja.

Geometrijski jednake figure euklidske geometrije su one koje se poklapaju u svim dijelovima. Poklapanje je u geometriji predstavljeno linearnim kontinuiranim pomjeranjem geometrijske figure po euklidskoj ravni.

Geometrijske figure pridružujemo uz obostrano jednoznačnu korespondenciju. Ovo pridruživanje nazivamo preslikavanjem i predstavljeno je linearnim kontinuiranim kretanjem od tačaka jedne figure do tačaka druge figure.

Geometrijsko preslikavanje dvije geometrijske figure predstavlja operaciju koja je definirana kao geometrijska transformacija.

Transformacije podudarnosti su elementarne transformacije u euklidskoj ravni, koje u geometrijskom prostornom modelu opisuju linearne dinamičke odnose prostornih formi i struktura.

Linearno kretanje u klasičnoj geometriji predstavlja obostrano jednoznačno preslikavanje geometrijskih figura i formi, koje ostavlja nepromijenjene linearost, poredak i rastojanje tačaka, odnosno jednakost dužina i uglova preslikanih figura.

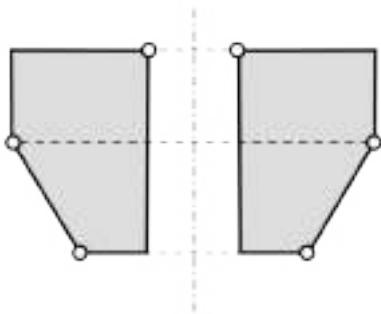
Poklapanje dvije geometrijske figure omogućeno je slijedećim postupcima:

- refleksijom,
- translacijom,
- rotacijom,
- kliznom refleksijom.

Ovo su osnovne operacije transformacija kojim se neka geometrijska figura preslikava u sebi jednaku. Ove transformacije predstavljaju grupu preobražaja neke prostorne geometrijske strukture nastalih pomjeranjem.

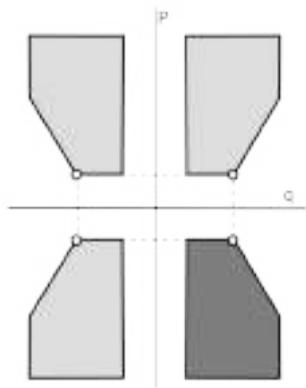
Refleksija, predstavlja specifičan vid preslikavanja neke geometrijske figure. Da bi se fizički moglo predstaviti kretanje figure koja se refleksivno preslikava, figura mora biti zarotirana u odnosu na ravan u kojoj leži.

Transformacija refleksije se dobiva projiciranjem tačaka geometrijske figure preko jedne prave, ose refleksije, tako da se normalama na tu osu, za jednake dužine, tačke preslikavaju u refleksivnu figuru. Osa preslikavanja je podjednako udaljena od tačke i njene refleksivne slike. Veličine i uglovi u refleksiji su jednaki (invarijantni), ali se mijenja orijentacija geometrijskih figura.



Slika 28.
Refleksija geometrijske figure preko ose refleksije.

Kod kombinacije dvije refleksije, sa dvije ose preslikavanja koje se sijeku u nekoj tački pod proizvoljnim uglom, bitan je redoslijed transformacija, jer dvije transformacije preko različitih osa nisu komutativne (ne može se promijeniti njihov redoslijed i dobiti isti rezultat), osim u slučaju kada su dvije ose ortogonalne (okomite jedna na drugu).



Slika 29.
Kombinacija dvije refleksije.

Ose refleksije (p i q) sijeku se pod pravim ugлом
- rezultat je isti (figura dole desno), bez obzira na redoslijed transformacija:
 pq ili qp .

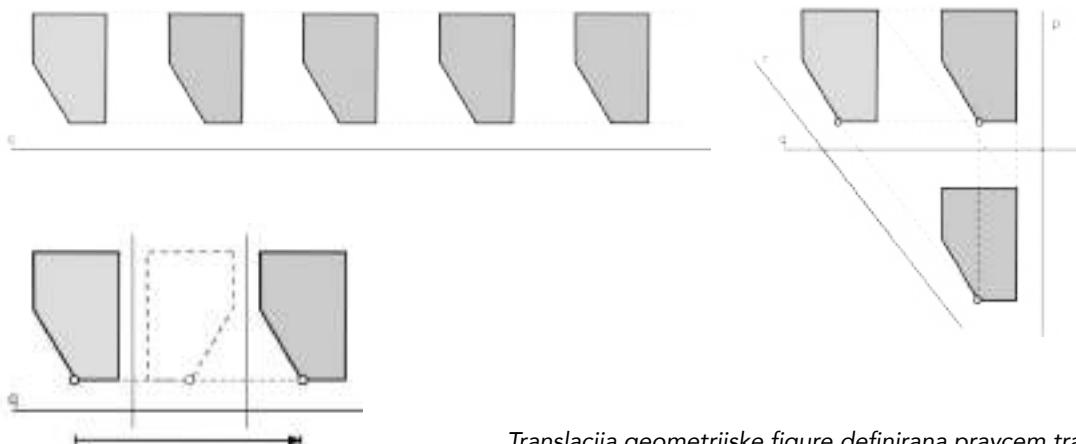
Kombinacija dvije refleksije može biti identična figura prvoj figuri, ukoliko je osa preslikavanja ista za obje refleksije a smjer preslikavanja obrnut (inverzan). Ovakva transformacija naziva se identična transformacija, i tretira se kao jedinična transformacija.

Proizvod dvije transformacije refleksije se ovisno o položaju osa refleksije tretiraju kao transformacije translacije ili rotacije. Konačni produkt transformacija refleksije naziva se kongruencija ili izometrija. Svaka izometrija zadržava jednake dužine pravaca, veličine uglova, poredak tačaka i paralelnost pravaca dvije pridružene geometrijske figure.²⁸

²⁸ Max, Jeger. *Transformation Geometry*. George Allen & Unwin, London, 1966. pp. 20-31.

Translacija je tip geometrijskog preslikavanja, u kojoj svaka tačka geometrijske figure ima linearni pomak u prostoru za istu distancu, zadržavajući jednakost uglova i dužina, kao i paralelnost pravaca. Translacija se može predstaviti kao rezultanta dvije refleksije preko dvije paralelne ose, za neku konstantnu distancu. Translacija je određena pravcem okomitim na ove dvije ose, pa se može zaključiti da je translacija determinirana pravcem i smjerom translacije, uz određenu distancu između tačke i njene projekcije (vektor translacije).

Translacija kao produkt dvije refleksije je direktni tip izometrije, jer je orientacija figure poslije translacije nepromijenjena. Produkt dvije uzastopne translacije je translacija, a poredak operacija preslikavanja nije uslovljen, jer su kombinacije translacija komutativne.²⁹ Slijed dvije translacije može biti zamijenjen jednom rezultantnom translacijom. Produkt dvije translacije preko pravaca p i q , može biti zamijenjen jednom translacijom preko pravca r .



Slika 30.
Translacija geometrijske figure definirana pravcem translacije.

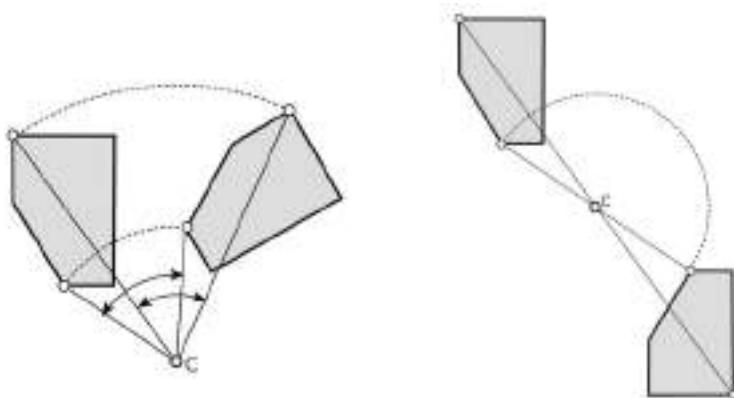
Translacija kao produkt dvije refleksije. (slika lijevo)
Dvije translacije zamijenjene jednom rezultantnom translacijom. (sl. desno)

²⁹ Ibid. p. 39.

Rotacija predstavlja preslikavanje geometrijske figure tako da svaka tačka opisuje kružnu putanju, za isti usmjereni ugao, oko jedne tačke, centra rotacije. Transformacija rotacije može se predstaviti kao rezultat dvije refleksije kod kojih se ose refleksije sijeku u jednoj tački, centru rotacije.

Produkt dvije rotacije je rotacija za ugao koji je algebarska suma uglova obje rotacije, a poredak operacija preslikavanja nije uslovljen, ukoliko je centar rotacije isti. Za dva različita centra rotacije, kombinacije dvije rotacije nisu komutativne.

Rotacija oko tačke za ugao od 180^0 je specijalan slučaj rotacije, koji se naziva poluokret.

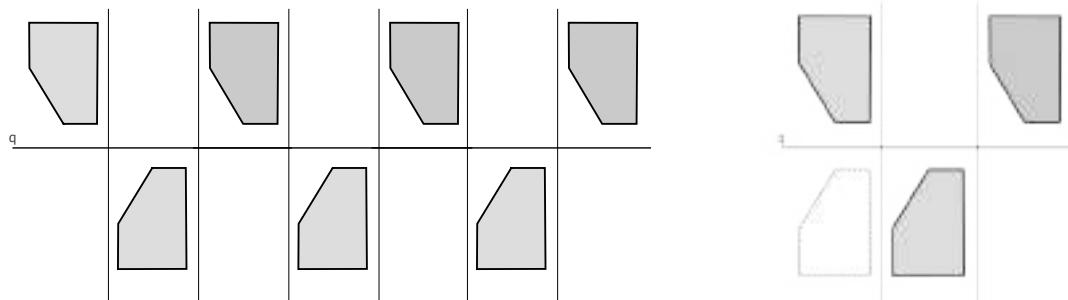


Slika 31.
Rotacija oko centra rotacije za
određen ugao. (lijevo)
Rotacija za ugao 180^0 kao
poluokret.

Translacija i rotacija predstavljaju grupu direktnih izometrija i mogu se svesti na dvije kombinacije refleksija. Kombinacija parnog broja refleksija daje rotaciju i translaciju, a neparan broj refleksija daje refleksiju ili kliznu refleksiju.³⁰

³⁰ I. M. Yaglom, *Geometric Transformations I*, 1975. pp. 25, 32-34, 36-37.

Klizna refleksija je izometrijska transformacija koja predstavlja proizvod refleksije i translacije kod koje je vektor translacije paralelan osi refleksije.



Slika 32.

Klizna refleksija geometrijske figure.
Klizna refleksija kao proizvod neparnog broja refleksija. (desno).

Bilo koje dvije podudarne (kongruentne) figure mogu se kretanjem u ravni dovesti do poklapanja (koincidencije) ili rotacijom ili translacijom, odnosno refleksijom i kliznom refleksijom ukoliko su dvije figure suprotne orientacije.

3. 2. 2. Transformacije sličnosti

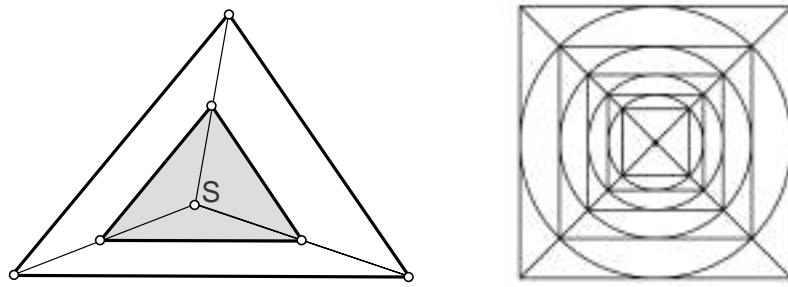
Transformacije za koje veličine geometrijskih figura ne moraju biti nepromjenjive - invarijantne, ali se zadržava konstantan omjer dužina korespondenčnih linearnih segmenata, uz svojstva zadržavanja linearnosti, paralelnosti pravaca i jednakosti uglova, nazivaju se transformacije sličnosti. Transformacijama sličnosti geometrijske figure preslikavaju se u sebi slične figure.

Transformacije podudarnosti se mogu tretirati kao podgrupa transformacija sličnosti kod kojih je faktor uvećanja 1. Transformacije sličnosti su konačan produkt izometrije i uvećanja.

U grupu geometrijskih transformacija sličnosti spadaju: homotetija kao generalni oblik transformacija sličnosti ili uvećanja/umanjenja geometrijske figure, refleksivna sličnost (proizvod refleksije i homotetije) i centralno-slična rotacija ili spiralna sličnost (proizvod rotacije i homotetije).

Homotetija je preslikavanje ravnine kojom se pridružuju preslikane tačke pomoću centra homotetije i koeficijenta homotetije, koji predstavlja faktor uvećanja ili umanjenja distance bilo koje dvije tačke pridruženih figura ravni.

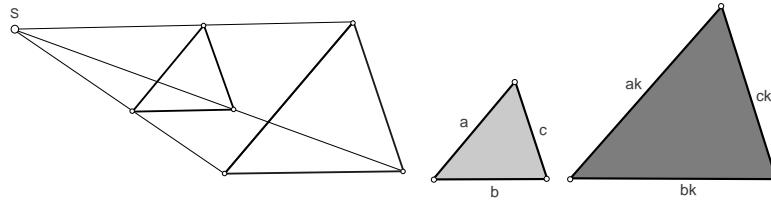
Homotetijom se linearne geometrijske figure preslikavaju u figure sa paralelnim odgovarajućim stranicama, koje su proporcionalne uz određen koeficijent proporcionalnosti.



Slika 33.
Transformacija sličnosti -
homotetija.

Preslikavanje tačaka geometrijske figure se vrši preko pravca, sa središtem u jednoj tački (S), uz određen faktor uvećanja ili smanjenja (k), koji predstavlja omjer udaljenosti tačke i njene projekcije do središta projiciranja (S), odnosno omjer dužina linearnih segmenata dvije pridružene figure.

Stranice poligonalnih figura transformacijom sličnosti ostaju u proporcijama $1:k$ a njihove površine u omjeru $1:k^2$, gdje je k faktor proporcije uvećanja (umanjenja).

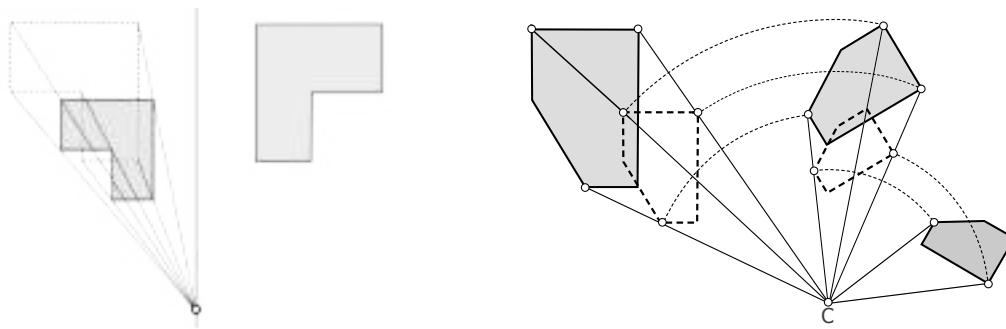


Slika 34.
Preslikavanje geometrijske figure
sa centrom u tački (S).

Stranice figura su umanjene/
uvećane za isti koeficijent (k).

Refleksivna sličnost određena je osom refleksije na kojoj se nalazi i središnja tačka preslikavanja u sličnu figuru. Poredak operacija preslikavanja i rotacije odnosno refleksije za drugi slučaj nije relevantan za krajnji rezultat ovakvih transformacija.

Centralno - slična rotacija ili spiralna sličnost, određena je centrom rotacije (C) koji je ujedno i središnja tačka preslikavanja u sličnu figuru, faktorom skaliranja k i uglom rotacije.



Slika 35.
Refleksivna sličnost i centralno-slična rotacija.

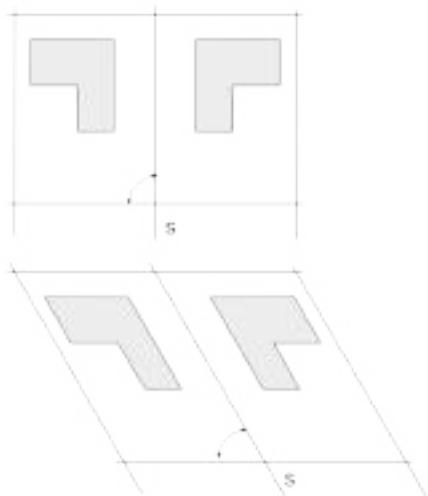
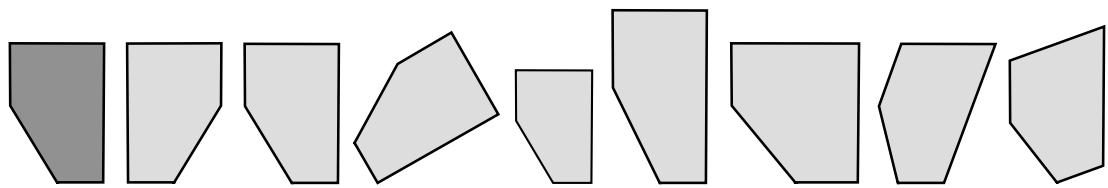
3.2.3. Afine transformacije

Afine transformacije su tip transformacija koji je definiran u XVIII stoljeću u radovima Eulera. Afine transformacije obuhvataju sve takve transformacije u kojima se zadržava poredak tačaka odnosno kolinearnost i poredak linija, paralelnost pravaca, omjeri dužina geometrijskih figura, ali uglovi ne moraju ostati jednaki. Afine transformacije, za koje je mjerni broj ugla invarijanta a mjerni broj dužine nije, su transformacije sličnosti. Afine transformacije obuhvataju sve transformacije sličnosti i predstavljaju generalniji tip transformacija.

U affine transformacije u euklidskoj ravni spadaju:

- refleksija,
- translacija,
- rotacija,
- skaliranje (proporcionalno uvećanje/umanjenje dužina),
- rastezanje (uvećanje/umanjenje dužina u jednom smjeru),
- smicanje (uvećanje/umanjenje uglova u jednom smjeru).

Afine transformacije mogu biti kombinacija različitih transformacija sličnosti, npr. refleksije, smicanja i istezanja ili skraćenja. Afine transformacije mogu se naći u različitim složenijim metodama grafičke reprezentacije prostornih tijela, kao što su kose i aksonometrijske projekcije.

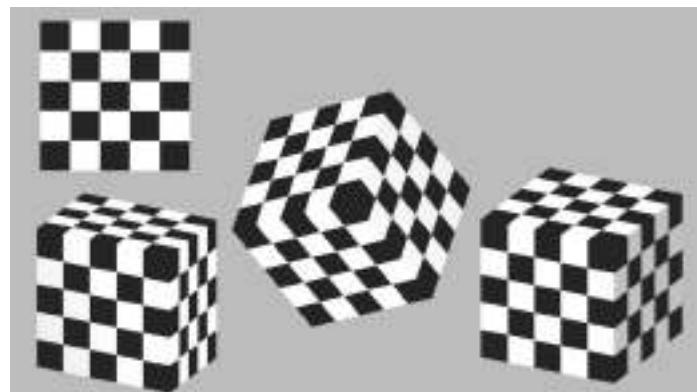


Slika 36.

Afine transformacije.

Gore: Afine transformacija geometrijske figure kao kombinacija transformacija podudarnosti i sličnosti: refleksije, smicanja za određen ugao i istezanja za određen koeficijent.

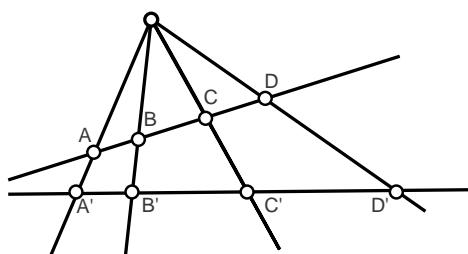
Dole: Afine transformacije u aksonometrijskim projekcijama; affine transformacije dvodimenzionalne figure i trodimenzionalnog tijela.



3.2.4. Projektivne transformacije

Principi projektivne geometrije u periodu Renesanse su otkriveni i primijenjeni u praktičnom smislu, na osnovu empirijskih i praktičnih metoda, rezultirajući novim pristupom prostornom grafičkom prikazivanju u formi perspektivne slike još u XIV i XV stoljeću u radovima slikara i arhitekata kao što su Brunelleschi, Piero della Francesca i Leonardo da Vinci. Projektivna geometrija kao dio matematskih nauka se teoretski razvija u radovima Gerarda Desarguesa i Blaise Pascala u XVII stoljeću, čime je dobila svoju generalnu geometrijsku podlogu. Svoj cjelovit izraz i generalnu formu projektivna geometrija dobila je i u okvirima Gaspard Mongeove Nactne geometrije u XVIII stoljeću, a u XIX st. J. Poncelet je projektivnoj geometriji dao sistemsku matematsku formu i strukturu.

Metričke relacije u projektivnim transformacijama nisu invarijantne, dužine i uglovi se mijenjaju u neprestano skalirajućoj proporciji, suviše kompleksnoj da bi bilo praktično primjenjivo mjerjenje kojim bi sve bilo dovedeno u jednostavne direktnе proporcijeske odnose. U projektivnoj geometriji su invarijante relacioni odnosi poretka tačaka, kolinearnost i složeni unakrsni proporcijeski odnosi tačaka i pravaca.



$$AC/BC : AD/BD = A'C'/B'C' : A'D'/B'D'$$

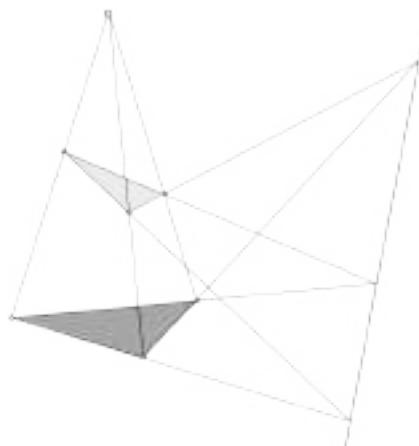
Slika 37.

Projektivitet proporcijeskog odnosa korespondentnih tačaka na dvije prave.

Projektivna geometrija bavi se transformacijama preslikavanja geometrijskih figura na neku ravan, odnosno invarijantama projektiviteta. Centar projektivnog odnosa dat je tačkom iz koga polaze projekcijski zraci kojim se uspostavlja projekcijski odnos dvije figure. U projektivnoj geometriji dva pravca presjekom daju tačku, a paralelni pravci sijeku se u beskonačno dalekoj tački. U projektivni geometrijski prostor uključuju se beskonačni elementi: tačka u beskonačnosti, pravac u beskonačnosti i beskonačno daleka ravan. Centar projektivnog odnosa iz koga polaze projekcijski zraci može biti u beskonačnosti, čime su projekcijski zraci paralelni.

U projektivnoj geometriji povezani su različiti oblici geometrijskih figura, kod kojih se mijenjaju dužine i uglovi, kao različite projekcije jedne figure. Možemo govoriti o određenoj perspektivnoj sličnosti figura u projektivnom odnosu.

Desargova teorema uspostavlja korespondenciju parova stranica trougla u projektivnom odnosu (povezanim zracima iz jedne tačke) tako da se parovi svih korespondirajući stranica sijeku na jednoj zajedničkoj pravoj.



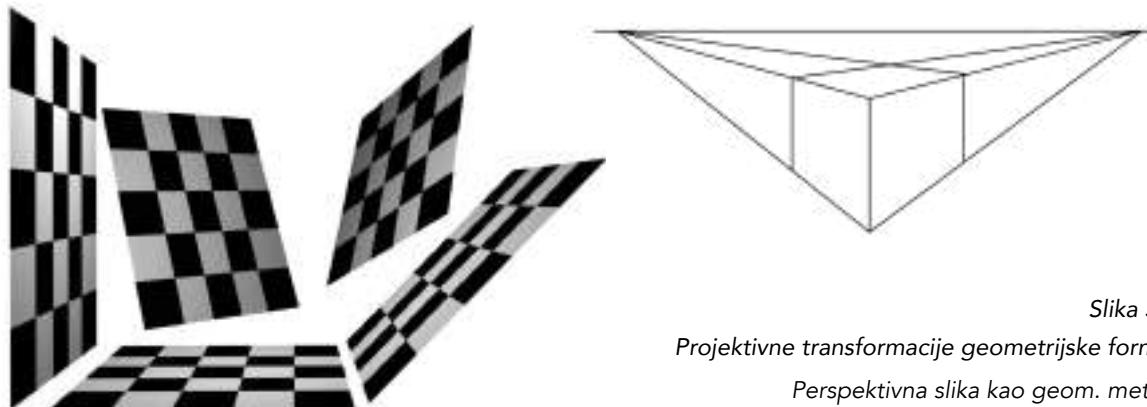
Slika 38.

Korespondencija stranica dva trougla u projektivnom odnosu.

Parovi korespondentnih stranica sijeku se u tačkama na jednoj pravoj.

Najznačajniji koncept koji je fundamentalan u projektivnoj geometriji je princip dualnosti, koji podrazumijeva uzajamnu korespondenciju odnosa tačaka i pravaca. Tako je princip da spoj dvije tačke određuju jedan pravac korespondentan principu da presjek dva pravca određuju jednu tačku. Dualnost tačke i pravca omogućila je korelaciju tačaka na nekoj krivoj i njenih tangentih, tako da bilo koja krivulja može biti predstavljena ne samo kao kompleks tačaka, već i kao dualni kompleksi pravaca - tangentih tačaka krivulje.

Iz projektivne geometrije mogu se izvući zakonitosti formiranja slike trodimenzionalnog prostora i njegovih relacija, dobivene iz jedne tačke posmatranja, koja daje približne utiske realnom sagledavanju nekog objekta odnosno njegovoj posmatranoj slici. Projektivne transformacije obuhvataju geometrijskim zakonitostima konstante svijeta vizualne percepcije, promjenjivih, različitih izgleda istog objekta u prostoru. Projektivna geometrija obuhvata složene konstruktivne metode prostornih tehniki reprezentacije u tehnici i umjetnosti, reprezentirajući ne samo konačne aspekte prostorne forme već uključujući i beskonačne aspekte u jedinstvenom prostornom geometrijskom sistemu.



Slika 39.
Projektivne transformacije geometrijske forme.
Perspektivna slika kao geom. metod
reprezentacije perceptivnog prostora.

3.3. NEEUKLIDSKE GEOMETRIJE

Geometrija kao apstraktna matematička disciplina razvija se unutar svojih zadanih aksiomatskih okvira u sve složeniju strukturu. Iako sve više apstraktna ona svojim razvojem otkriva sve kompleksnije zakonitosti koje se mogu prepoznati i primijeniti i u realnom prirodnom prostoru. Često se među naučnicima i filozofima razmatra pitanje fundamentalnog geometrijskog poimanja i modeliranja prostora, te istinitosti i realnosti apstraktnih zakona. Da li su zakoni geometrije istinsko ustrojstvo fizičkog i materijalnog prostora ili su unutarnje ustrojstvo mentalnog, da li svoj izvor imaju u vanjskom i percipiranom svijetu ili u unutarnjem i racionaliziranom logičkom mišljenju.

Zakonitosti geometrijskog ustrojstva prostora postale su osnova mnogih otkrića u prirodnim naukama, a ujedno i najrigorozniji njihov dokaz, kao model kojim je moguće reprezentirati nove naučne teorije i hipoteze. Euklidска geometrija je bila osnova naučnog pristupa prostornim odnosima i problemima prostorne metrike, sve do otkrića mogućnosti postojanja neeuclidskih geometrija, koje su se razvile u XIX stoljeću u radovima Gaussa, Lobachevskog, Bolyaia i Riemanna. Kompleksnost geometrijskog prostora utemeljenog u euklidskoj geometriji, gradualno raste razvojem nauke, od statičnog prostora klasične grčke nauke, preko mehanističke Njutnove dinamike do Ajnštajnovog prostorno-vremenskog relativizma. Teorija relativiteta dovodi do primjene kompleksnijih i generalnijih prostornih sistema u kojima se realiziraju zakoni neeuclidskih geometrija.

Razvoj neeuclidskih geometrija se zasniva na preformulaciji petog postulata euklidske geometrije, odnosno problemu paralelnosti pravaca. Neeuclidske geometrije mogu se osnovati na različitim interpretacijama aksioma paralelnosti, pa su se nove geometrije razvile na aksiomu koji ne poznaje paralelnost pravaca. Euklidska geometrija postaje samo jedan geometrijski model među mnogima, određen petim postulatom, dok se iz ostalih postulata može definirati neutralna geometrija koja svoju interpretaciju dobiva kroz različite modele.

Neeuclidske geometrije zasnovane su na postavci da je kroz jednu tačku prostora moguće povući beskonačan broj paralelnih pravaca, ili se ne može povući nijedna paralela, što se kosilo sa euklidskom geometrijom i dalo potpuno nove karakteristike prostora. U neeuclidskoj geometriji suma uglova u trouglu može biti veća ili manja od 180^0 , odnosno suma uglova može varirati, a trouglovi koji su jednakih uglova uvijek su kongruentni (mogu se poklapati), što nije slučaj u euklidskoj geometriji.³¹

U neeuclidskim geometrijama pojam linije i apstraktne površine tretira se konceptualno i ne mora biti interpretiran u okvirima euklidskog geometrijskog modela. Pojmovi kao tačka, linija i ravan, nisu definirani standardnom grafičkom interpretacijom, već logičkim pravilima i aksiomima međusobnih odnosa.

U neeuclidskim geometrijama geometrijske površi izlaze izvan trodimenzionalnog koordinatnog kartezijanskog okvira, a pojam pravca kao najkraće udaljenosti dvije tačke gubi svoju jednoznačnost.

³¹ Morris, Kline. *Mathematics and the Physical world*. John Murray, London, 1959. p. 45.

3.3.1. Eliptička i hiperbolička geometrija

Neeuklidske geometrije mogu biti modelirane unutar euklidskog prostora i njegovih koordinata, ali njihova struktura je generalnija i apstraktnija, obuhvatajući matematičke strukture višedimenzionalnih i zakriviljenih prostora. Predstava zakriviljenih prostora nije intuitivna, ali se može naći određena korelacija dvodimenzionalnih modela neeuclidskih geometrija i euklidske geometrije. U Rimanovoj eliptičkoj geometriji npr. pravci mogu imati strukturu kružnica i konačne dužine. Veličina uglova u trouglu je ovisna o površini trougla. U eliptičkoj geometriji paralelne linije ne postoje. Moguće je prikazati ovakav prostor na sfernom modelu, gdje su linije interpretirane kao kružnice a ravni kao sfere.³² Međutim, ovakav model je samo aproksimacija mnogo kompleksnijeg karaktera neeuclidske geometrije koja integriše konačno i beskonačno, jer je beskonačnost definirana kao ono što nema granice. Eliptički prostor je konačan ali istovremeno bez granica.

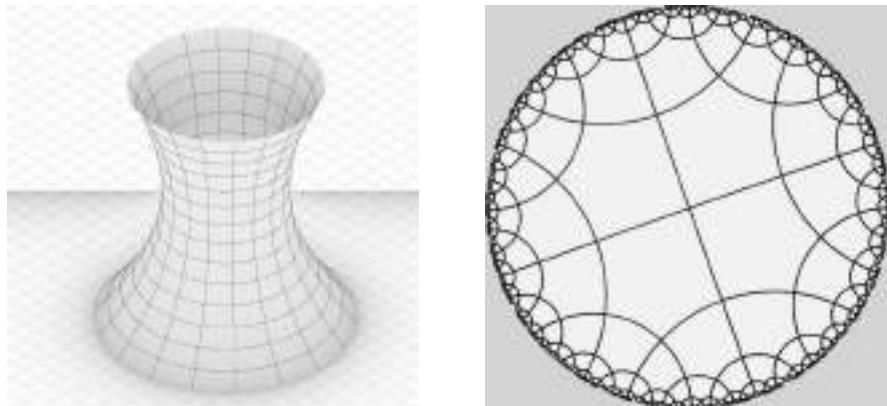


Slika 40.
Sfernali model eliptičke geometrije.

³² Marvin, J. Greenberg. *Euclidean and non-Euclidean geometries: development and history*. W. H. Freeman and Company, New York, 1994. p. 443.

Hiperbolička geometrija razvija se radovima Gaussa, Bolyaia i Lobachevskog. Kroz jednu tačku hiperboličkog prostora može se povući bezbroj paralela nekoj pravoj, a suma uglova u trouglu manja je od 180° . U hiperboličkoj geometriji sličnost geometrijskih figura se ne zadržava povećanjem ili smanjenjem figure, svako smanjenje/uvećanje znači i distorziju figure.

Hiperbolička geometrija može se interpretirati u Euklidskom geometrijskom modelu. Definirani su različiti modeli hiperboličke geometrije međusobno izomorfni. Poincareov model hiperboličku ravan nemetrički reprezentira Euklidskom kružnicom.



Slika 41.
Grafički interpretirani modeli hiperboličke geometrije.
Hiperbolička ravan konstantne negativne zakrivljenosti može se modelirati u euklidskom prostoru hiperboloidom.
Poincareov kružni disk reprezentira hiperboličku ravan, a segmenti kružnica reprezentiraju prave u hiperboličkoj ravni.

Eliptička geometrija površina konstantne pozitivne zakrivljenosti i hiperbolička geometrija površina konstantne negativne zakrivljenosti su karakteristične vrste neeuklidskih geometrija koje nadilaze okvire euklidske geometrije. Izmjenom jednog aksioma Euklidske geometrije uspostavljene su nove vrste geometrije koje su logički konzistentne. Postavlja se pitanje geometrijske korelacije sa konkretnim prostorom, a posebno je pitanje konstruktivne sintetičke reprezentacije i vizualizacije različitih geometrija. Razvoj neeuklidskih geometrija je ukazao na više značnost geometrijskog modeliranja i različite mogućnosti interpretacije geometrijskih zakonitosti.

U neeuklidskim geometrijama pojam linije i apstraktne površine tretira se konceptualno i ne mora biti interpretiran u okvirima euklidskog geometrijskog modela. Eliptička geometrija površina konstantne pozitivne zakrivljenosti i hiperbolička geometrija površina konstantne negativne zakrivljenosti predstavljaju realne neeuklidske prostore.

Neeuklidske geometrije našle su svoju primjenu u matematici i savremenoj fizici, ali u praktičnim inženjerskim problemima, radi oslanjanja inženjerskih disciplina na metričke kvalitete prostora i klasične fizičke veličine, euklidska geometrija ostala je najprikladniji geometrijski model koji može biti interpretiran i analitički i sintetički. Poincare tvrdi da aksiomi geometriju nisu ni sintetički apriori sudovi ni eksperimentalne empirijske prirode, već slobodno odabrane konvencije odabrane između mnogih mogućih, od kojih je po njemu Euklidska geometrija najprikladnija.³³ Ova prikladnost znači da iako eksperimentalne činjenice u fizičkom svijetu mogu biti samo približne, dovoljno su saglasne sa principima euklidske geometrije.

³³ H. Poincare. *Science and Hypothesis*. 1905. p. 158.

3.4. TOPOLOGIJA

Nova grana geometrije, topologija, proizašla je iz proučavanja svojstava geometrijskih formi koja ostaju invarijantna pod različitim oblicima transformacija koje mijenjaju oblik neke geometrijske figure savijanjem pravaca, rastezanjem i sabijanjem dužina i uglova, odnosno takvim deformacijama koje mijenjaju i mjerne i oblikovne karakteristike figura, zadržavajući jedino broj i kontinuirani poredak tačaka.

Topološki prostor je generalniji od metričkog prostora. Topologija se može u osnovi tretirati kao analiza pozicija, kao nemetrička i nekvantitativna geometrija. U topologiji nema rigidnih objekata, promjena pozicije znači i deformaciju.³⁴

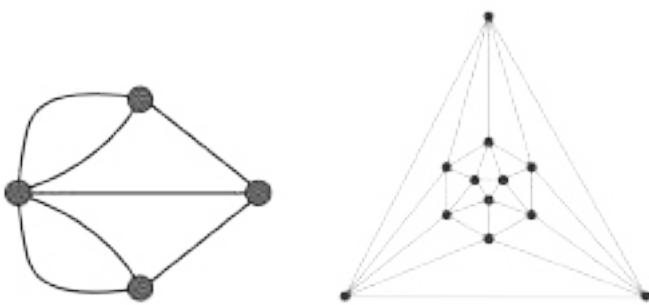
Topologija je grana geometrije čiji se začetak može naći već u radovima matematičara u XVIII stoljeću kao što je Eulerov rad o Koenigsberškim mostovima, koji se bavi problemima konekcije i povezivanja u prostoru, koji su ovisni o određenim geometrijskim svojstvima koja nisu ni metrička ni projektivna.³⁵ Euler zamjenjuje površinska područja tačkama a mostove linijama, predstavljajući prostorne konfiguracije grafom koji brojem čvorova i veza daje strukturu, koja predstavlja topološku šemu prostornih relacija.

³⁴ James, Newman. ed. *The World of Mathematics Vol. 1.* George Allen & Unwin, London, 1956. pp. 570-573.

³⁵ Leonhard, Euler. Seven Bridges of Königsberg. u Newman, James, ed. *The World of Mathematics Vol. 1.* 1956. pp. 573-580.

Proučavanjem odnosa tjemena, ivica i površina poliedara, po formuli Eulera, odnos broja ivica, čvorova i površina kod jednostavnih poliedara (bez unutarnjih šupljina) je konstantan : $V-E+F=2$ (V -čvorovi, E - ivice F -površine)³⁶.

Formula Eulera ne odnosi se samo na tijela ograničena ravnim površinama i ivicama već i zakrivljenim površinama i ivicama. Broj čvorova, broj ivica i površina, a ne njihove metričke veličine ili proporcije, definiraju topološke karakteristike prostornih objekata. (Sl. 43.)



Slika 42.

Topološke karakteristike prostornih formi.
Broj čvorova i konekcija definira topološke
prostorne karakteristike.

U XIX i XX stoljeću topologija se razvija kao nauka o kvalitativnim karakteristikama prostornih formi, koja se bavi svojstvima geometrijskih objekata koja ostaju invarijantna u transformacijama koje mijenjaju metrička i projektivna svojstva objekata.

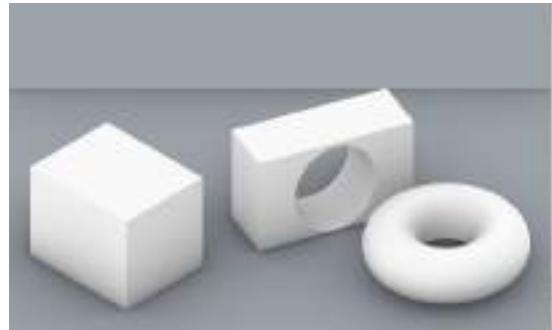
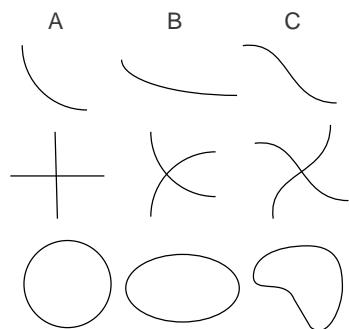
U topološkom prostoru principi konvergencije, povezanosti i kontinuiteta - neprekidnosti, su osnovni invarijantni principi. Metrički euklidski i neeuclidiski prostori su specijalan slučaj topoloških prostora.

³⁶ James, Newman. *The World of Mathematics* Vol.1. 1956. p. 572.

3.4.1. Topološke transformacije

U topološkim transformacijama mogu se mijenjati dužine, linije se mogu transformisati u krivulje, ali određena svojstva objekata ostaju nepromjenjiva, kao što su kontinuitet i poredak tačaka. Topološki jednaka tijela ne moraju imati isti oblik ni veličinu, pa su npr. trougao, kvadrat i kružnica topološki jednaki objekti.

Topološki objekti nisu određeni oblikom već relacionim odnosima. Broj ivica ili njihovih presjeka, orientacija površina i zatvorenost ili otvorenost figura i tijela su osnovna topološka svojstva koja su relevantna u određivanju ekvivalencije geometrijskih objekata. Kod topoloških transformacija postaju relevantne razlike između otvorenih i zatvorenih figura.

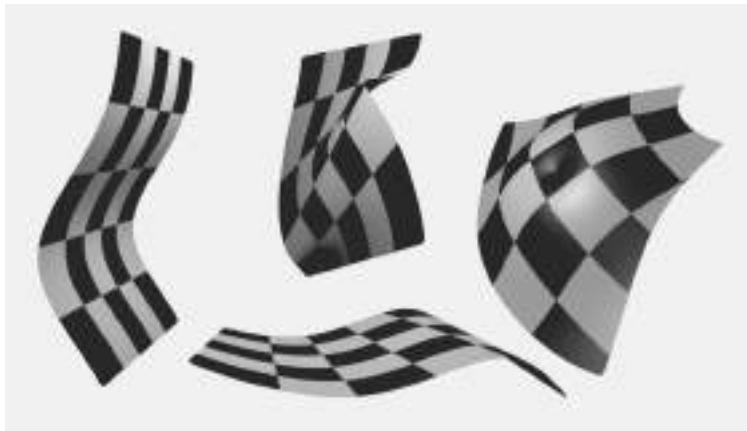


Slika 43.

Topološka ekvivalencija geometrije prostornih objekata.

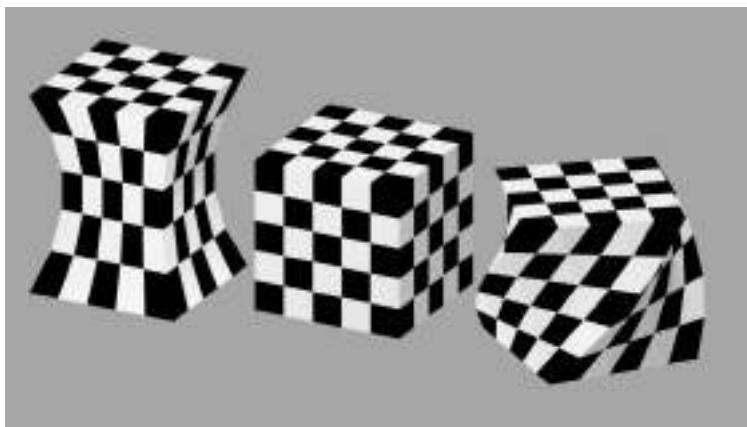
Figure A, B i C su topološki jednake.
Objekti s unutarnjim otvorom iako različitog oblika
topološki su jednaki.

U dvodimenzionalnoj ravni grupa transformacija kojom su obuhvaćena kontinuirana preslikavanja tačaka "jedan na jedan" naziva se homeomorfizam ili topološka transformacija ravni. Svojstva geometrijskih figura koja su invarijantna pod grupom topoloških transformacija su blizina, kontinuitet i odvojenost tačaka figure.



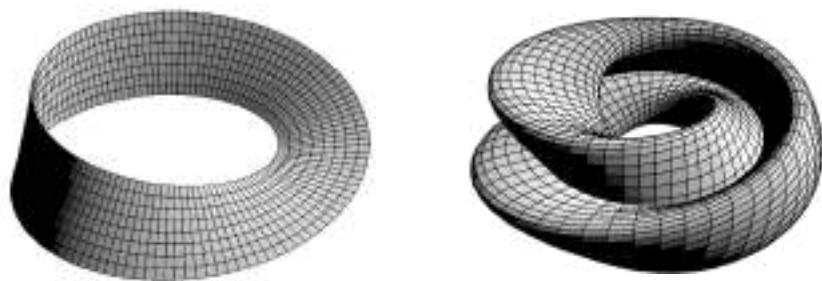
Slika 44.

Topološke transformacije geometrijskih figura i tijela.



Topologija otkriva svojstva geometrijskih površi koja izlaze izvan granica uobičajene predstave geometrijskih figura, kao prostornih oblasti kod kojih postoji jasna granica unutarnjeg i vanjskog područja, a u trodimenzionalnom prostoru svaka klasična figura ima dvostruku orijentaciju kao lice i naličje njene površine. U topologiji do izražaja dolaze površine kao Moebiusova traka kod koje se ne može utvrditi orijentacija, te se smatra jednostruko orijentisanom. Moebiusova traka ima jednu površinu i jednu ivicu. Presijecanje trake po sredini ne prekida traku.³⁷ (Sl. 45.)

Geometrijska tijela kod kojih se ne mogu utvrditi spoljašnja ili unutarnja područja, predstavljaju složeni vid topoloških prostora, koji nemaju početak ili kraj, pa se u ograničenom prostoru pojavljuje beskonačna mogućnost kretanja. Pitanje dimenzionalnosti topoloških prostora nije jasno određeno sa tri dimenzije kartezijanskog prostora, pa topološki prostori mogu biti višedimenzionalni. Reprezentacija složenih topoloških formi u višedimenzionalnim prostorima postaje relevantan način njihove imaginacije.



Slika 45.
Moebiusova traka i Kleinovo tijelo.

³⁷ James, Newman. *The World of Mathematics* Vol.1. 1956. p. 595.

3.5. KONCEPT SIMETRIJE

Riječ simetrija ima porijeklo u Grčkoj riječi **συμμετρία** - summetría, što u prevodu znači sumjerljivost. Simetrija je kao pojam u svom originalnom značenju bila vezana uz relativnu jednakost, zajedničku mjeru ili proporciju. Pojam simetrije veže se i uz geometrijsku pravilnost kao svojstvo geometrijskih figura i tijela kojim su regulirani međusobni odnosi dijelova.³⁸

Princip simetrije kao jedan od fundamentalnih geometrijskih principa, prožima cjelokupni fizički i organski svijet. Princip simetrije svojstvo je prirodnih zakona. Ovaj princip osnova je organizacije prostornih fizičkih struktura, od mikro do makro svijeta, od atoma u molekulama do prostornih oblika živih bića, dajući izuzetno bogatstvo prostornih varijacija. Po Weily "Prostor sam ima punu simetriju koja odgovara grupi svih automorfizama, svih sličnosti"³⁹

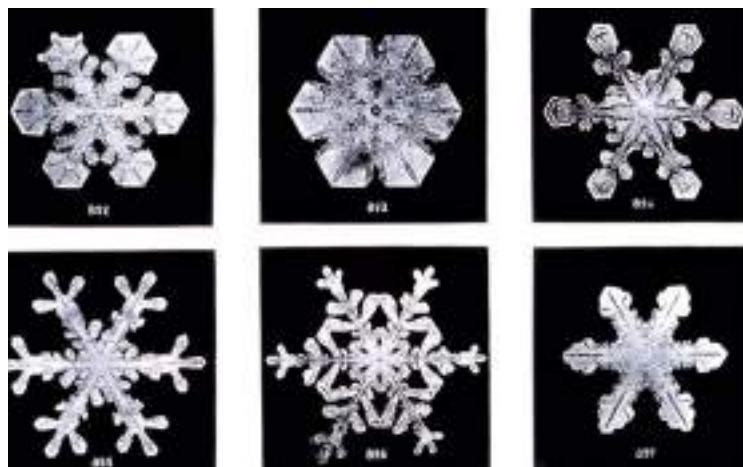
Princip simetrije je jedan od načina organizacije i u vještačkim sistemima ljudske kreativne djelatnosti, prije svega u arhitekturi. Po Vitruviju⁴⁰ princip simetrije je rezultat proporcije, kao korespondencije među mjerama dijelova i cjeline prema dijelu koji je odabran kao standard.

³⁸ A.V. Shubnikov, A. Koptsk. *Symmetry in science and art*. Plenum Press, London, 1974. pp. 1- 4.

³⁹ Henry, Weyl. *Symmetry*. Princeton University Press, Princeton, 1952. p. 45.

⁴⁰ P. M. Vitruvius. *De arhitektura libri decem - Deset knjiga o arhitekturi*. Golden Marketing, Institut građevinarstva Hrvatske, Zagreb, 1999.

Princip simetrije označava jedinstven princip usklađenosti dijelova u cjelinu, nadilazeći kompoziciju dijelova kao njihov zbir, tražeći zajednički unutarnji princip povezivanja. Principima simetrije uređeni su odnosi među dijelovima neke cjeline, tako da nijedan nema neki izuzetan položaj u odnosu na druge, već su ravnotežno raspoređeni. Individualnost dijelova ustupa mjesto jedinstvu i harmoniji cjeline.



Slika 46.

Princip simetrije zastavljen u formiraju snježnih kristala.

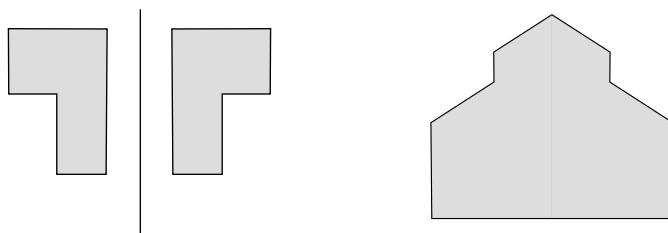
Simetrija u geometrijskom smislu predstavlja invarijantu konfiguracije elemenata pod grupom automorfnih transformacija.⁴¹ Pri automorfnim transformacijama svi strukturalni odnosi ostaju nepromijenjeni. Pojam simetrije povezuje dvije ili više geometrijskih struktura u relacijske odnose koji predstavljaju neku vrstu jednakosti, s tim da pojam jednakosti može obuhvatati različite unaprijed zadane vanjske ili unutarnje relacijske parametre: oblik, konturu i veličinu ili relacijske odnose poretka, kontinuiteta, paralelnosti i dr.

⁴¹ automorfizam – transformacija koja zadržava strukturu prostora, Henry, Weyl. *Symmetry*, 1952. p. 18.

Princip simetrije kao invarijante transformacija materijalnih i idealnih sistema možemo definisati kao poseban rod geometrijske zakonitosti. Simetričnom se naziva takva struktura kod koje su geometrijski i fizički jednaki dijelovi razmješteni u odnosu jedan spram drugog odgovarajućim modelom, tako da je uređenost u određenom smislu jedinstvena za sve dijelove.⁴²

Geometrijska jednakost u klasičnom poimanju simetrije znači ili podudarnu jednakost ili refleksivnu jednakost. Elementi pomoću kojih u geometriji ostvarujemo simetrično preslikavanje su tačka, prava i ravan. Osnovni tipovi simetrije u euklidskoj ravni su osna ili refleksivna, centralna i rotaciona, translaciona i klizna simetrija, koje direktno odgovaraju izometrijskim transformacijama.

Osna simetrija predstavlja vid transformacije refleksivne podudarnosti, kojom se obostrano jednoznačno preslikavaju tačke jedne geometrijske figure na drugu, u odnosu na osu simetrije. Osna simetria predstavlja preslikavanje geometrijske figure u sebe samu, a slika koju dobivamo predstavlja refleksnu sliku date figure. Nepromijenjen ostaje poredak tačaka, veličina i oblik figure, dok je orientacija različita. Ova simetria se naziva i bilateralna simetria. Često se u svakodnevnoj upotrebi pod pojmom simetrije ova simetria uzima kao osnovna.

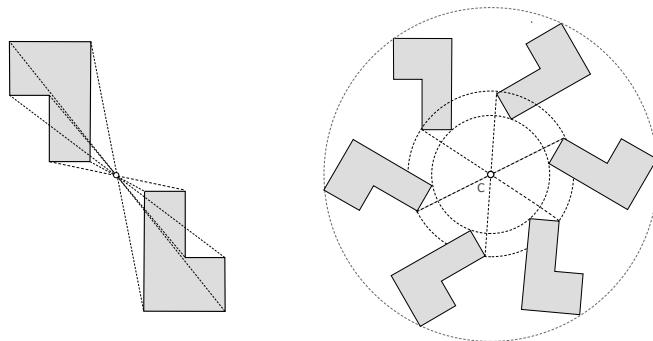


Slika 47.
Osna simetrija.

⁴² A.V. Shubnikov, A. Koptsik. *Symmetry in science and art*. 1974. p. 4.

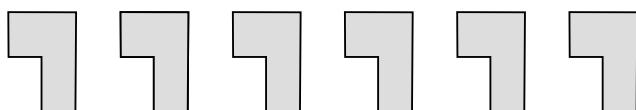
Centralna simetrija je transformacija podudarnosti u ravni koja je zadana nekom tačkom kao centrom simetrije. Centar simetrije je polovište udaljenosti između tačke i njene simetrične slike. Centralnom simetrijom geometrijske figure se transformiraju u podudarnu figuru iste orientacije.

Rotaciona simetrija je transformacija podudarnosti zadana tačkom rotacije i uglom rotacije. Svaka tačka opisuje kružni put oko centra rotacije. Rotacionom simetrijom geometrijske figure se transformiraju u podudarnu figuru iste orientacije.



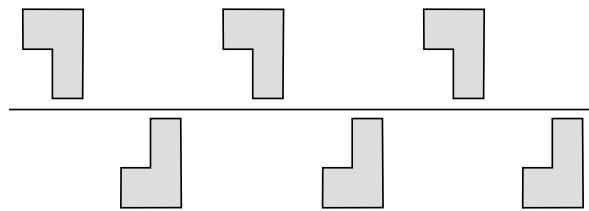
Slika 48.
Centralna (lijevo) i rotaciona simetrija
(desno).

Translatorna simetrija u ravni preslikava tačke figure pomoću zadanog pravca translacije koji je isti za sve tačke. Ovo preslikavanje predstavlja direktno kretanje geometrijske figure za neku određenu distancu.



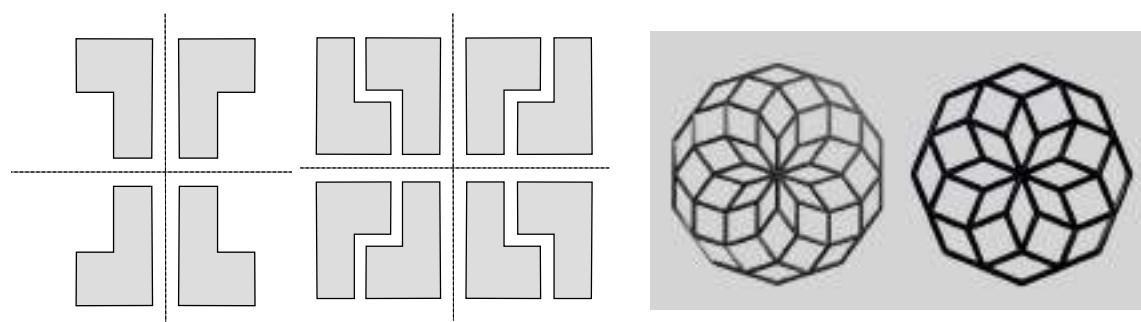
Slika 49.
Translatorna simetrija.

Klizna simetrija predstavlja proizvod osne simetrije i translacije. Poklapanje dvije geometrijske figure u ovakvom tipu simetrije zahtijeva sukcesivnu primjenu dvije transformacije - translacije za određenu distancu i refleksije preko ose koja se poklapa ili je paralelna sa pravcem translacije. Redoslijed transformacija nije relevantan.



Slika 50.
Klizna simetrija.

Kombiniranjem različitih tipova simetrije, nastaju figure složene simetrije. Složene kombinacije simetrije u ravni se nazivaju i ornamentalnom simetrijom.



Slika 51.
Figure nastale kombiniranjem različitih tipova simetrije.

3.5.1. Teorija grupe i ornamentalna simetrija

Matematske grupe definirane su operacijama koje povezuju objekte u nekom setu, po određenim pravilima kojima su definirana svojstva elemenata grupe i produkti kombinacija elemenata grupe. Grupe imaju jedinične ili neutralne elemente koji u kombinaciji s drugim elementima grupe ne mijenjaju njihova svojstva, a za svaki element grupe postoji i inverzni član, tako da je njihov produkt jedinični element.

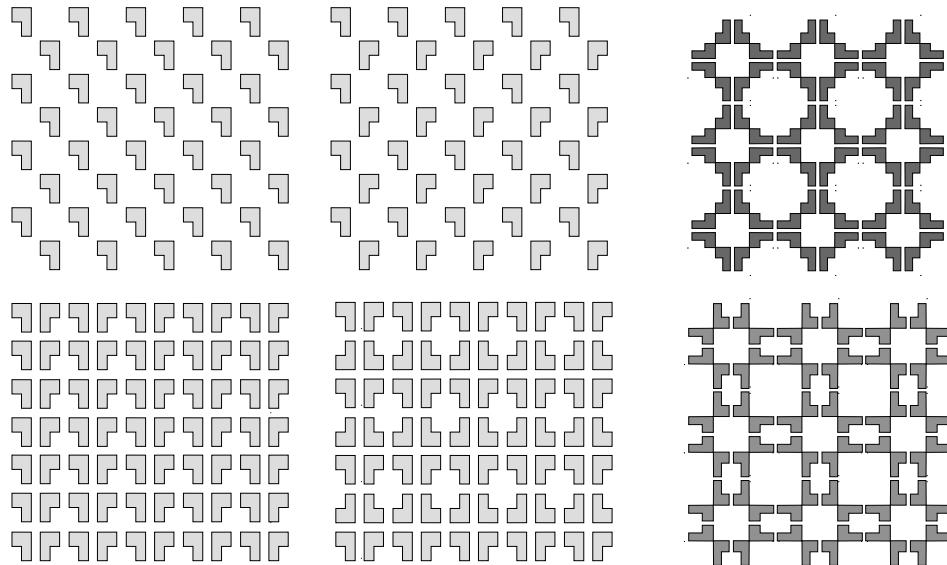
Teorijom grupe u matematici je omogućeno istraživanje različitih sukcesivnih kombinacija transformacija. Teorija grupe obuhvata i ujedinjuje sve simetrije, definirajući konačan broj tipova kombinacija simetričnih transformacija. Koncept grupe transformacija postaje fundament savremene geometrije. Euklidska geometrija definirana je transformacijama sličnosti i podudarnosti, afina geometrija afnim transformacijama, projektivna geometrija projektivnim transformacijama, uz dalje razrade novih geometrija zasnovanih na određenim grupama transformacija

Grupa simetrija određuje svojstva geometrijskih objekata kao set transformacija pod kojima objekt ostaje neizmijenjen. Grupa simetrija obuhvata kombinaciju transformacija koje su sukcesivne, a krajnji rezultat je proizvod niza transformacija. Simetrična grupa neke figure je matematska struktura koja sadrži sve simetrije figure, kao operacije sukcesivnih simetrija. Red simetrične grupe je broj elemenata (simetrija) u grupi.

Simetrične grupe višeg reda pripadaju figurama koje imaju veći broj simetrija uključujući refleksiju, rotaciju ili poluokret.

U savremenoj fizici i matematici simetrija dobiva šire značenje. Teorijom grupa definiran je tačan broj različitih tipova simetrije.

Ornamentalna simetrija se odnosi na dvodimenzionalne, plošne geometrijske uzorce koji su obrazovani na principima simetrije. Simetrija plošnih geometrijskih uzoraka proizvod je organiziranog ponavljanja nekog motiva.⁴³

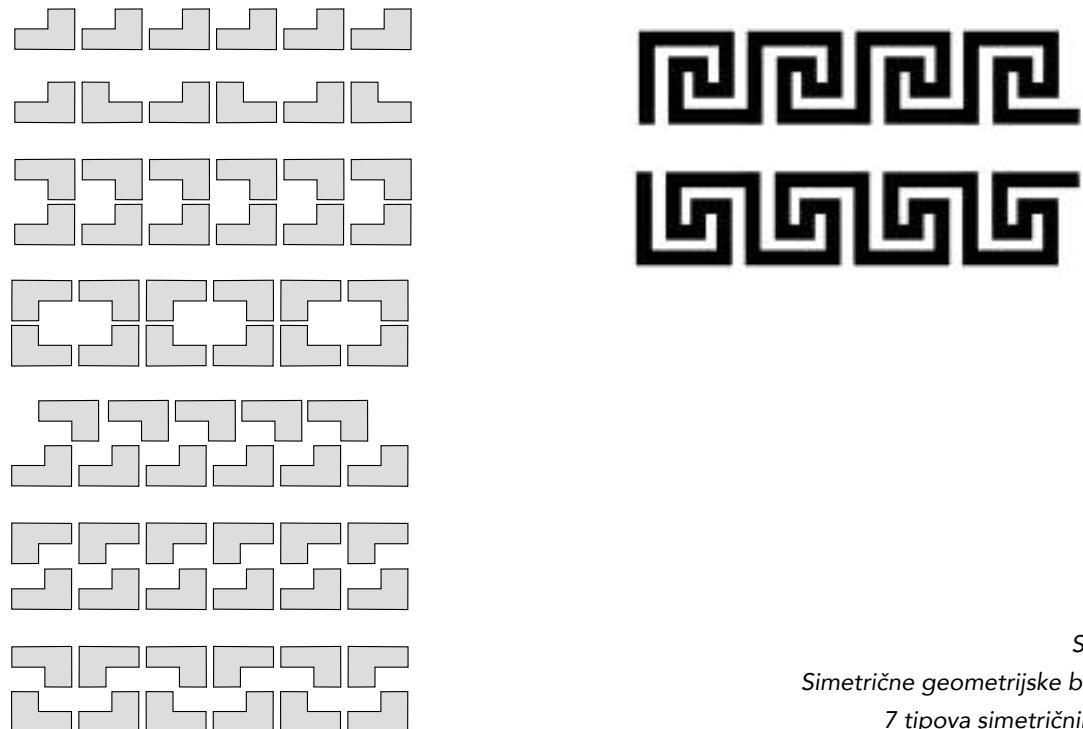


Slika 52.
Plošna ornamentalna simetrija.
Geometrijski uzorci organizirani po principima simetrije.

⁴³ Jay, Kapraff. *Connections, The Geometric Bridge Between Art and Science*. World Scientific Publishing, Singapore, 2001.

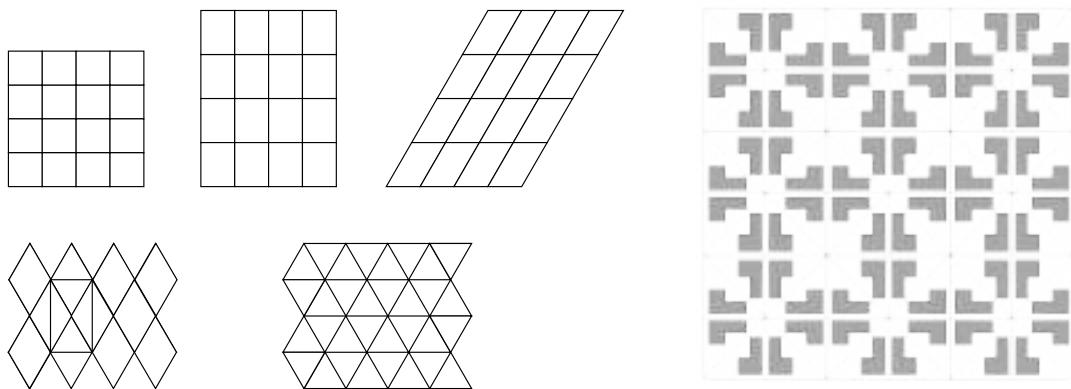
Simetrične geometrijske bordure ili trake, predstavljaju linearne simetrične kompozicije geometrijskih elemenata, odnosno nekog figurativnog geometrijskog motiva u jednom pravcu. Kombiniranjem translacije, osne simetrije i klizne simetrije nastaju složene ornamentalne figure.

Postoji 7 tipova geometrijskih bordura koje obuhvataju različite operacije transformacija kao što su translacija, refleksija, rotacija i klizna refleksija, odnosno različite grupe simetrija.



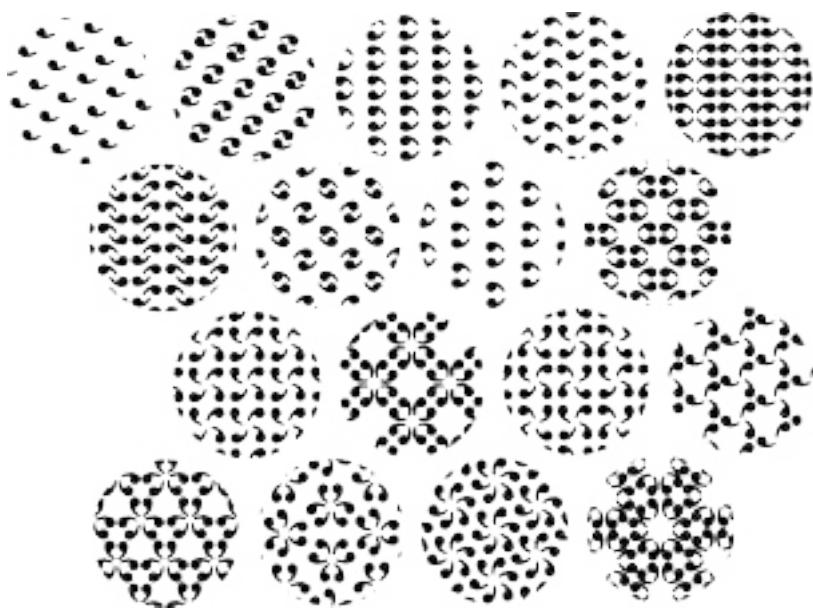
Slika 53.
*Simetrične geometrijske bordure:
7 tipova simetričnih traka.*

Plošna ornamentalna simetrija predstavlja simetričnu kompoziciju figurativnih elemenata u dva pravca, koja se može definirati dvodimenzionalnom mrežom. Ovisno o tipu mreže (kvadratna, pravougaona, heksagonalna, romboidna, paralelogramska), i primijenjenim transformacijama koje dopušta svaki tip mreže, matematski je definirano 17 tipova geometrijskog plošnog ornamenta.



Slika 54.
*Plošna ornamentalna simetrija definirana dvodimenzionalnom mrežom.
Pet tipova simetričnih mreža i ornamentalni prostorni uzorak u mreži.*

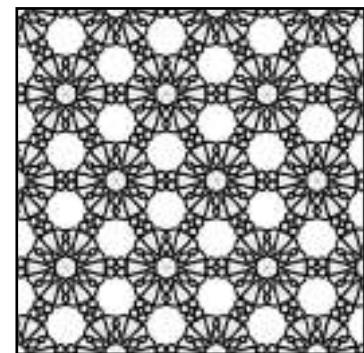
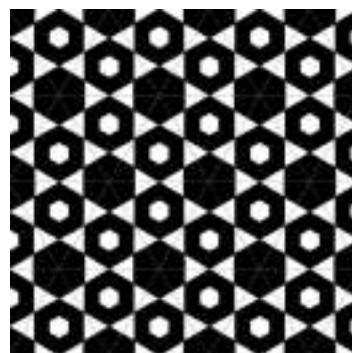
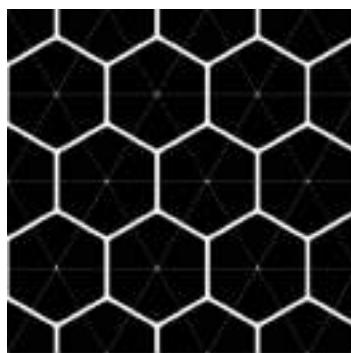
Iz ograničenog broja tipova plošnih ornamentalnih struktura moguće je dobiti neograničen broj varijacija prostornih ornamentalnih uzoraka. Rekonstrukcija pravila simetrije po kome je neki kompleksniji uzorak organiziran, može biti izuzetno složen zadatak, iako su osnovni principi simetrične organizacije bazirani na jednostavnim odnosima i mrežama.



Slika 55.

Tipovi plošne ornamentalne simetrije:
17 mogućih tipova simetričnih kompozicija datog uzorka.

Varijacije istog tipa plošne simetrije daju različite prostorne uzorke.
(dole)



3.5.2. Simetrija geometrijskih figura

Simetrija kao uređeno ponavljanje osnovnog uzorka, obuhvata pod pojmom uređenosti geometrijski strukturirane kombinacije transformacija.⁴⁴ Stepen simetrije geometrijskih figura određen je brojem transformacija pod određenom grupom transformacija, kod kojih strukturalna svojstva figure ostaju invarijantna.

Transformacije mogu biti organizirane kao grupe koje mogu imati subgrupe. Time se mogu dovesti u vezu geometrijski objekti na osnovu stepena simetrije i grupa simetrije. Različite prostorne geometrijske konfiguracije geometrijskih elemenata mogu biti identične kao apstraktne simetrične grupe koje imaju istu geometrijsku strukturu.

Pravilne planarne geometrijske figure posjeduju simetriju koja predstavlja kombinaciju osnovnih tipova simetrije. Simetrie određene osom kao bilateralna ili osna simetrije su najelementarniji i najpoznatiji tip simetrije figura.

Složeni tip simetrije određen je osama simetrije i tačkom i uglom rotacije, pa se složeni tipovi simetrije nazivaju i kaleidoskopskom grupom simetrija.⁴⁵ Postupcima kao što su rotacija i refleksija oko osa određenih u odnosu na figuru, osnovne geometrijske figure se preslikavaju same u sebe. Presjek osa simetrije daje tačku koja je centar rotacione simetrije figura.

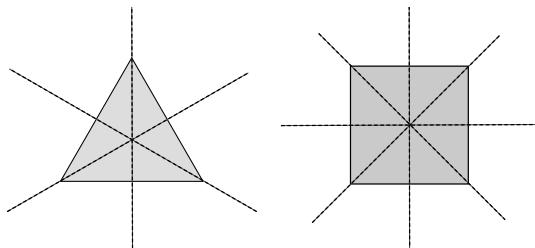
⁴⁴ Jay, Kapraff. *Connections, The Geometric Bridge Between Art and Science*. 2001. pp. 408-409.

⁴⁵ Ibid. pp. 413-415.

Dihedralne grupe kaleidoskopske simetrije obuhvataju neograničen broj grupa, koje se označavaju počevši od grupe D₁ koja obuhvata jednu osu refleksije, do grupe D_n, koja može obuhvatiti bezbroj osa refleksije i koju posjeduje geometrijska figura kružnice.

Trougao se preslikava refleksijom preko tri svoje ose i rotacijom oko centra presjeka ovih osa za 120^0 i 240^0 . Simetrija trougla naziva se dihedralnom grupom D₃ simetrije reda 6, jer uključuje jedno identično preslikavanje, tri refleksije i dvije rotacije.⁴⁶

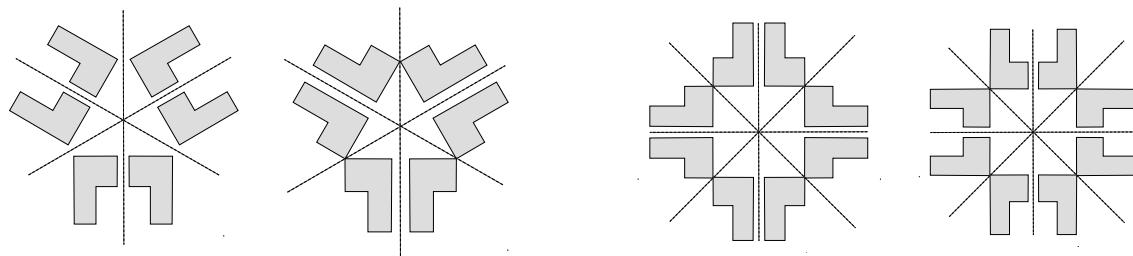
Kvadrat ima četiri refleksivne simetrije oko dvije ose paralelne stranicama i dvije dijagonalne ose, te četiri rotacione simetrije oko tačke presjeka ovih osa za 0^0 , 90^0 , 180^0 i 270^0 .



Slika 56.

Grupe simetrija trougla i kvadrata.

Presjek osa simetrije daje tačku koja je centar rotacione simetrije figura.
Dole: Različite geometrijske konfiguracije istih grupa simetrije.

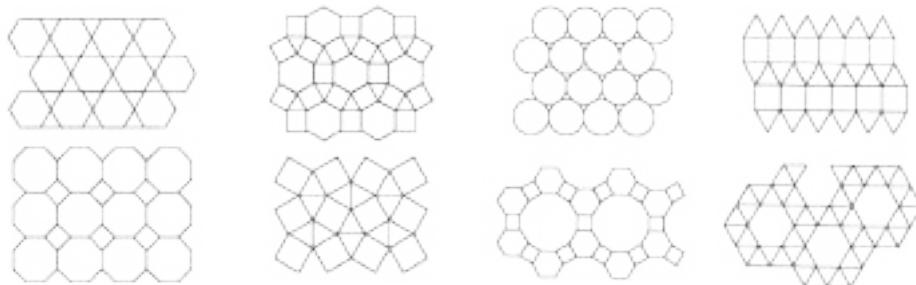


⁴⁶ Jay, Kapraff. *Connections, The Geometric Bridge Between Art and Science*. 2001. pp. 413 - 414.

3.5.3. Simetrične teselacije ravni

Teselacije (popločavanje) ravni, predstavljaju potpuno pokrivanje ravni geometrijskim figurama bez praznina i definirane su grupama transformacija. Simetrične teselacije su formirane grupama izometrija kao operacijama rotacije, translacije i refleksije.

Poseban slučaj simetrične teselacije je prekrivanje ravni pravilnim mnogouglovima. Teselacije mogu biti osnovane na pravilnim jednakim poligonalnim figurama kao pravilna popločavanja, ili polu-pravilna sa različitim poligonalnim figurama. Postoje samo tri vrste simetrične pravilne teselacije, trougaona, kvadratna i heksagonalna. Polu-pravilne teselacije obuhvataju 8 tipova simetričnih grupa formiranih pravilnim figurama.⁴⁷ (Sl. 57.)



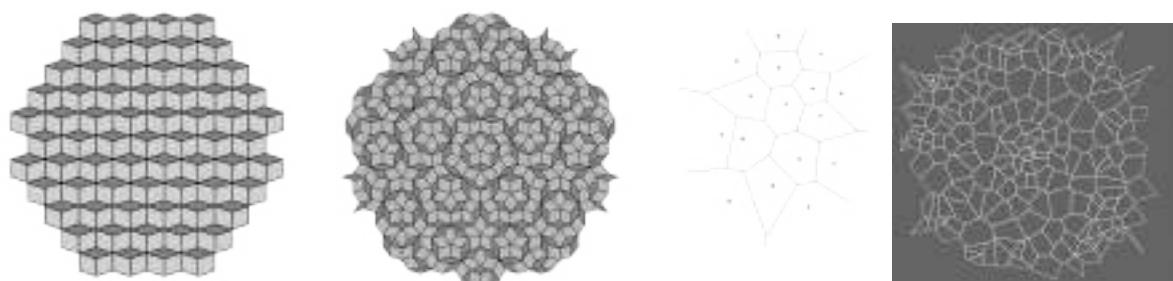
Slika 57.
Polu-pravilne geometrijske teselacije ravni.

Osam tipova popločavanja ravni pravilnim geometrijskim figurama: istostraničnim trouglovima, kvadratima, pravilnim heksaedrom, šestouglom, osmouglom i dvanaestougaonim poligonima.

⁴⁷ Ibid. pp. 168, 178.

Postoje periodične teselacije ravni sa ponavljajućim grupama uzoraka i aperiodične teselacije kod kojih nema ponavljajućih uzoraka. Aperiodične teselacije ne sadrže translacijsku simetriju, zadržavajući rotacionu i osnu simetriju. Posebno su matematički istraženi oblici aperiodičnih simetričnih teselacija pod nazivom Penrose teselacije.⁴⁸

Oblast teselacija ravni osim simetričnih struktura obuhvata i asimetrične geometrijske strukture. Iako nisu organizirane po karakterističnim principima i izometrijskim grupama simetrije, postoje matematičke i geometrijske zakonitosti koje definiraju i kompleksnije tipove teselacije ravni kao celularne mreže. Hiperboličke teselacije, samo-slične teselacije, voronoi dijagrami⁴⁹ i dr. su neki tipovi teselacija koji postaju aktualni ne samo u savremenoj geometriji već svoju primjenu, kao i ostali tipovi teselacija, imaju u praktičnom kreiranju prostornih struktura u dizajnu i arhitekturi.



Slika 58.
Periodične, aperiodične i asimetrične teselacije -
Voronoi diagram (desno).

⁴⁸ Po matematičaru i fizičaru Rogeru Penroseu, nazivaju se aperiodični uzorci teselacija u ravni bazirani na pentagonalnoj simetriji.

⁴⁹ Voronoi diagram: Podjela ravni sa n tačaka na konveksne poligone tako da svaki poligon sadrži tačno jednu generirajuću tačku, a svaka tačka u datom poligoni bliža je svojoj generirajućoj tački nego bilo kojoj drugoj. Definicija po Wolfram MathWorld <https://mathworld.wolfram.com/VoronoiDiagram.html>

3.5.4. Simetrija geometrijskih tijela

Strukturalna svojstva geometrijskih figura i tijela ne izražavaju se u geometriji samo statičnim fiksnim odnosima njihovih dijelova, već grupom simetričnih transformacija. Geometrijske figure i tijela mogu se transformisati jedna u drugu dodavanjem ili oduzimanjem određenih stepena simetrije. Ovaj proces naziva se lomljenjem simetrije.

Geometrijska tijela posjeduju simetrična svojstva u vidu rotacione i refleksivne simetrije. Geometrijsko tijelo posjeduje rotacionu simetriju ako je rezultat rotacije oko neke ose ista generalna konfiguracija tačaka, koje mogu mijenjati poziciju.⁵⁰

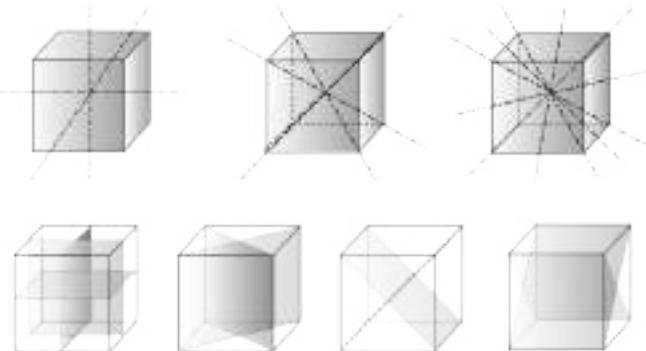
Za svaki od pet regularnih poliedara moguće je konstruisati grupu odgovarajućih simetrija. Simetrija tijela obuhvata sve rotacione i refleksivne kombinacije simetrije.

Primjer simetrije kocke, daje prikaz karakterističnih tipova i vrsta simetrije. Kocka ima 48 simetrija. Kocka ima ukupno 13 rotacijskih osa oko kojih je moguća rotacija 24 puta u položaje u kojim ostaje konfiguracija tačaka kocke nepromijenjena (invarijantna). Kocka je npr. invarijantna rotaciji oko centralne ose koja prolazi središtem nasuprotnih stranica, za rotaciju od 90° , 180° , 270° i 360° , što se tretira kao četverostruka rotaciona simetrija.⁵¹ Kocka posjeduje 3 četverostrukе, 4 trostrukе i 6 trostrukih ose simetrije. Simetrija kocke se može izraziti kao 4.3.2. (Sl. 59.)

⁵⁰ Jay, Kapraff. *Connections, The Geometric Bridge Between Art and Science*. 2001. p. 283.

⁵¹ Ibid. p. 283.

Refleksivna simetrija geometrijskog tijela definirana je sa ravnima simetrije koje dijele tijelo na dva identična dijela koji su uzajamne refleksivne slike. Kocka ima 9 ravnih simetrija koje dijele kocku na dva identična refleksivna dijela.



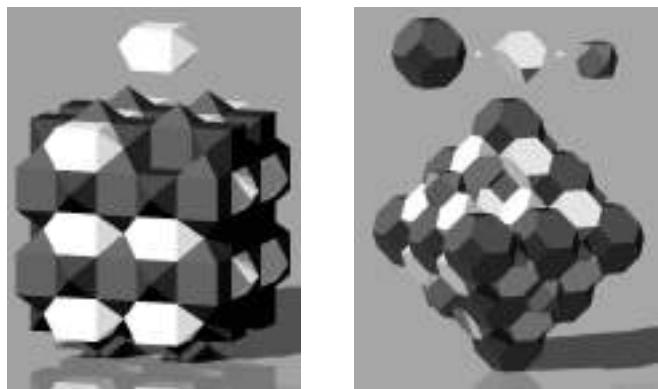
Slika 59.

Rotacijske ose simetrije kocke i ravnih refleksivnih simetrija kocke.

Kristalografska simetrija zasniva se na simetričnim prostornim trodimenzionalnim rešetkama. Kristalografska simetrija odnosi se na trodimenzionalne simetrične aranžmane geometrijskih elemenata koji tvore neku prostornu strukturu. Matematski je dokazano da postoji 230 tipova trodimenzionalnih prostornih kristalografskih ornamentalnih uzoraka.

Trodimenzionalne teselacije obuhvataju popunjavanje prostora poliedarskim tijelima, bez unutarnjih praznina, stvarajući trodimenzionalne kristalne strukture.

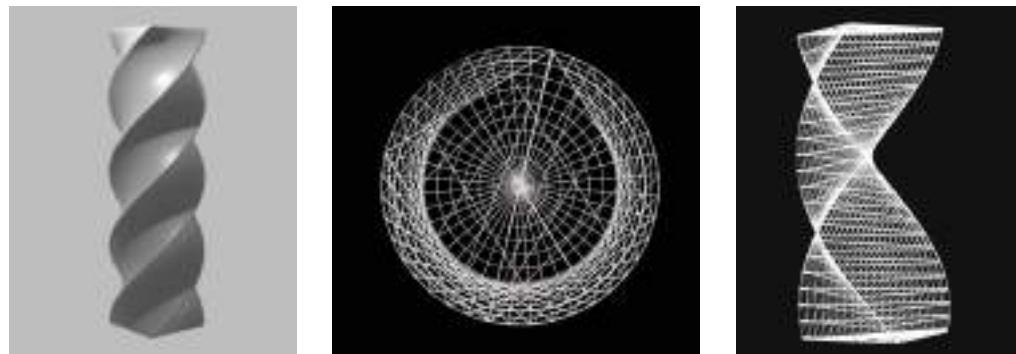
Zbog svojih simetričnih svojstava kocka je jedino Platonsko tijelo koje samo može multipliciranjem popunjavati prostor bez međupraznina, kao trodimenzionalna teselacija prostora stvarajući složenije prostorne strukture. Svojstvo popunjavanja prostora imaju npr. kombinacije tetraedra i oktaedra, kao i kombinacije kocke, oktaedra i zarubljenog oktaedra. Heksagonalne prizme takođe popunjavaju prostor u vidu teselacije. Otkriveno je mnoštvo varijacija popunjavanja prostora poliedrima.



Slika 60.

Trodimenzionalna teselacija prostora kombiniranim poliedrima.

Zavojna (*helikoidna*) simetrija kao rotirajuća translacija u trodimenzionalnom prostoru, je specifičan vid simetrije geometrijskih tijela, kao proizvod kombinacije rotacije neke geometrijske figure za određen ugao i translacije duž ose rotacije za određenu dužinu.



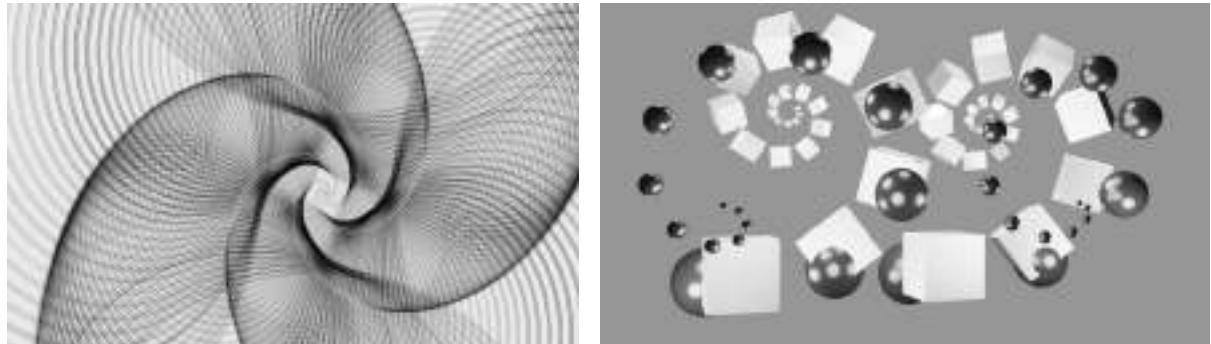
Slika 61.

Helikoidna simetrija kao rotirajuća translacija.

3.5.5. Simetrija neizometrijskih i neeuclidskih prostora

Pojam simetrije kao principa uređenosti dijelova nekim jedinstvenim modelom nadilazi okvire izometrijskih transformacija u euklidskom geometrijskom prostoru, obuhvatajući i transformacije sličnosti, samo-sličnosti pa i transformacije u neeuclidskim prostorima.

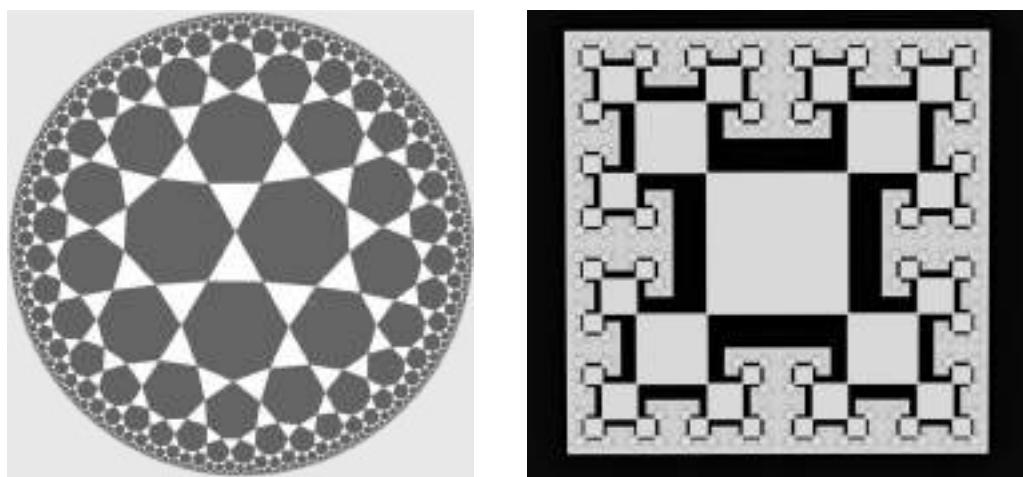
Spiralna simetrija određena je centrom rotacije, faktorom skaliranja i uglom rotacije, kao proizvod centralno-slične rotacije odnosno spiralne sličnosti.



Slika 62.
Spiralna simetrija.

Simetrija neeuclidskih geometrijskih prostora, koja nije određena metričkim pojmovima jednakosti, može biti ilustrovana u dvodimenzionalnom modelu hiperboličke geometrije, (Poincareov model) u kome je unutrašnjost kružnice hiperbolička ravan.

Fraktalna simetrija vezana je za nova područja geometrije koja se razvijaju u drugoj polovini 20. stoljeća, obuhvatajući geometrijske forme izuzetne vizualne kompleksnosti, koje pokazuju svojstva unutarnje pravilnosti koja se mogu obuhvatiti pojmom samosličnosti, kao relativne jednakosti kroz različite skale veličina



Slika 63.

Simetrija formi neeuklidske geometrije.

Model Poincareovog diska hiperboličke simetrije. (lijevo)

Fraktalna simetrija ili samosličnost. (desno)

4

KOMPLEKSNI DINAMIČKI PROSTORNI KONCEPTI I MODELI

Prostorne koncepcije mijenjaju se i razvijaju uporedo sa razvojem nauke i kompletne koncepcije svijeta. Dajući centralno mjesto racionalno-naučnom pogledu na svijet, zapadna civilizacija temelji modernu kulturu na čvrstoći i stabilnosti materijalizma, determinizma i utilitarnosti. Ovakav pogled na svijet prati i adekvatna koncepcija prostora, kao materijalne, utilitarne i determinirane strukture. Kao materijalna struktura prostor podlježe zakonima fizike, a determiniranost je geometrijski uslovljena.

Tretirajući prostor kao materijalnu strukturu, opisivu apstraktnim matematskim modelima, moderna civilizacija našla se pred kriznim razdobljem uslijed degradacije i rasparčavanja prirodne okoline, suprotstavljujući se njenim procesima i složenoj dinamici. Savremena naučna otkrića dovela su do preispitivanja temeljnih postavki klasične nauke kao što su apsolutna sigurnost i preciznost matematike, univerzalnost fizikalnih zakona, stabilnost i pasivnost materije, uzročnost i determiniranost pojava i procesa, što utječe i na preispitivanje pojmove prostora i vremena i njihovu konceptualizaciju.

4.1. SAVREMENI KONCEPTI PROSTORA

Automatizirana priroda klasične nauke prožeta je konceptima uzročnosti, determinizma, redukcionizma i racionalnosti. Na osnovu opisa ponašanja elementarnih čestica izvlače se zakonitosti globalnih prirodnih procesa. Prirodni procesi tretirani su kao univerzalni i determinirani vječnim zakonima.

Fizika kao nauka o materijalnim sistemima, utvrdivši ograničenost zakona koji definiraju stabilne, determinirane sisteme, okreće se procesima u kojima dominiraju razvojnost i nestalnost. Termodinamika, teorija relativnosti i kvantna mehanika otkrivaju da su stabilnost i jednostavnost klasične mehanike samo izuzeci, a da nestalnost i slučajnost vladaju prirodnim procesima. Klasični fizikalni zakoni nedovoljni su i neadekvatni za opisivanje složenih dinamičkih procesa koji se odvijaju u prirodi. Složene dinamičke strukture koje karakteriziraju mnoge prirodne procese, zahtijevaju kompleksnije modele.⁵²

Mikrofizika dovodi u pitanje cjelokupan klasični naučni sistem, utemeljen na apstraktnom prostoru i vremenu, komplementarnim pojmovima kao što su materija i energija, mirovanje i kretanje, tijela i procesi, na razdvajaju pojava na elementarne dijelove neovisne od cjeline.

⁵² Ilya, Prigogine. Isabelle, Stengers. *Order Out of Chaos: Man's New Dialogue with Nature*. Bantam Books, New York 1984. pp. 6-9, 214, 225.

Analitička podjela pojava na materijalna tijela i dinamičko kretanje u mikrofizici prelazi u sintetiziranu cjelinu materije i zračenja, materije i kretanja. Kvantna fizika otkriva da materija predstavlja polje vibracionih procesa, da se neprestano ponovo izgrađuje. Otkrića kvantne fizike zahtijevaju reviziju osnovnih pojmoveva prostora i vremena, uključujući i sve ostale pojmove vezane uz njih kao što su: materija, kretanje, tijelo, putanja, brzina i slično.

4.1.1. Rušenje klasičnog mehaničko-redukcionističkog naučnog modela

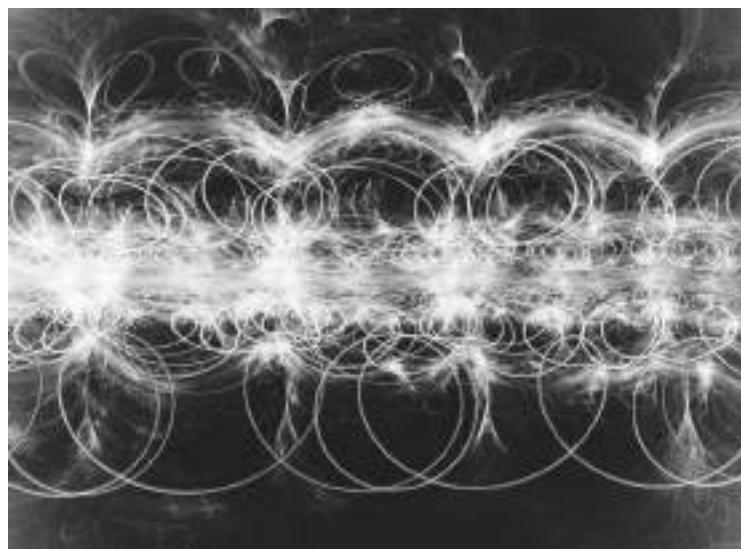
Savremena fizika izlazi iz okvira klasičnog prostora i klasične geometrije, otkrivajući njene limite. Sistemi moderne fizike reprezentuju razvojne nivoe i skokove, viši razvojni oblici ne mogu se bez ostatka svesti na niže. Opis elementarnih ponašanja nije dovoljan za razumijevanje cijelih sistema, a univerzalni zakoni zamijenjeni su univerzalnim konstantama određenog referentnog okvira.⁵³

Deterministički zakoni postoje samo u okviru određenih oblasti ili nivoa. Između ovih nivoa ne postoji direktna povezanost ili kontinuitet, već samo određena korespondencija. Pojavljuje se mogućnost postojanja više geometrija, gdje je svaka realna u granicama limita određenog nivoa ili oblasti u kojoj su determinirani njeni zakoni. Različite geometrije povezuje korespondencija ekvivalentnih odnosa. Euklidska geometrija postaje nedovoljna, neadekvatna za modeliranje kvantnih fenomena, pa su tzv. neeuclidske geometrije postale pogodnije za modeliranje prostornih zakona ovakvih fizikalnih sistema.

⁵³ Ilya, Prigogine. Isabelle, Stengers. *Order Out of Chaos: Man's New Dialogue with Nature*. 1984. pp. 8, 217-218.

Opšta teorija relativnosti otkriva da je koegzistirajući raspored materije različit, pa se javlja ideja o "zakrivenosti" prostora. Različite geometrije određuju različite "oblike" prostora, čija "zakrivenost" prevaziđa limite klasičnog modela euklidske geometrije. Postavlja se pitanje ograničenosti predstavljanja odnosno modeliranja bilo kog prirodnog fenomena u njegovoj potpunosti⁵⁴.

Neka matematska i fizikalna otkrića dovela su do novih filozofskih pristupa u kojima se u pitanje dovodi sigurnost matematske apstrakcije, odnosno njena odvojenost od konkretnog i promjenjivoga svijeta. Siguran, deterministički model prostora utemeljen u matematskom modelu, ruši se u savremenoj nauci, ostavljajući otvorenim pitanja sigurnosti spoznaja na kojima se temelje univerzalne istine, otvarajući područja matematike i geometrije ka evolutivnom razvoju i višim formama kompleksnosti.



Slika 64.
Ilustracija kompleksnih matematičkih
funkcija savremene geometrije.
Računarska grafika sistema matematički
iteriranih funkcija (IFS).

⁵⁴ Ibid. p. 225.

4.1.2. Organski prostorni koncepti

Antropocentričnoj mehanicističkoj slici koja karakterizira tehnološku civilizaciju, suprotstavlja se slika svijeta koja počiva na kompleksnosti i jedinstvu prirodnih procesa koji uključuju i samog čovjeka. Prostor kao dinamička kategorija, neodvojiva od vremena, obuhvata cjelovitost fizikalnih i evolutivnih organskih procesa, nelinearnog karaktera, heterogene, multidimenzionalne i višestruko nivelirane strukture. Prostorni sistemi prirodnog organskog prostora su otvoreni, međusobno povezani, svojom aktivnošću kreirajući prostorno-vremensku cjelinu kao kreativni stvaralački sistemi.

Organska slika svijeta karakteristika je većinom istočnjačke filozofije, preko budističkih i hinduističkih principa da sve stvari teku beskrajno jedna u drugu, do taoističkih principa življenja u toku s prirodom, ali se mogu naći i u klasičnim starogrčkim filozofskim premišljanjima filozofa Heraklita, Platona i Aristotela. Organska koncepcija prostora vezana je u savremenom dobu uz ekologiju, granu nauke koja prostor tretira kao životnu sredinu u kojoj su živi i neživi dijelovi međusobno povezani dinamičkim tokovima i ciklusima.

Predmet proučavanja ekologije nisu pojedinačna svojstva ili izolovane pojave, već sveukupnost uzajamnih odnosa živog i neživog svijeta. Ekološki prostor nije statična struktura, već dinamička interaktivna cjelina. Ova cjelina uključuje višeslojne sisteme koji se međusobno prožimaju predstavljajući otvorene strukture. Prirodna sredina je energetski i kibernetski samoreguliran, kompleksno organiziran sistem. Predstavlja dinamičku interaktivnu strukturu koja ima procesni karakter, u neprestanom procesu nastajanja, dinamičkog razvoja i promjene.

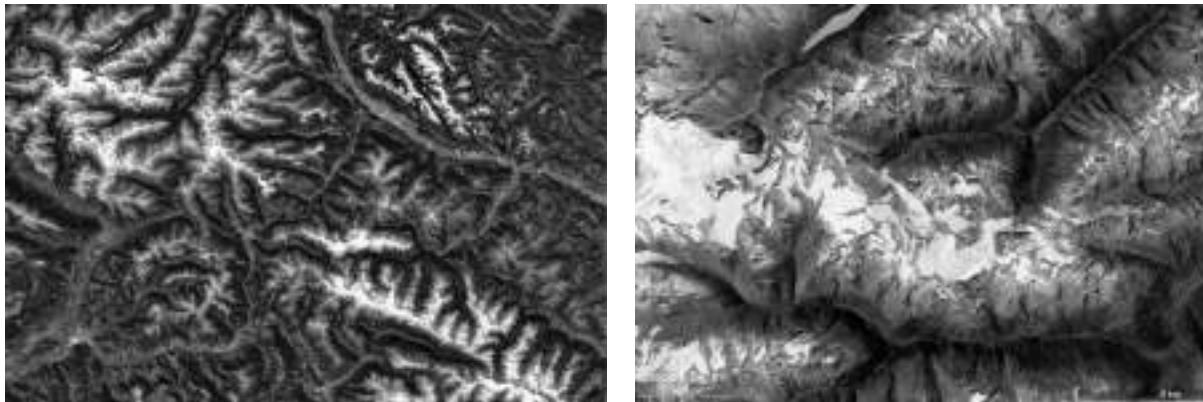
Prirodni ekološki prostor karakterizira organski rast, raznovrsnost, nehomogenost i hijerarhijska organizacija podstruktura. Prirodni oblici kao ishodi neprestanih transformacija predstavljaju dio kompleksnog strukturnog sistema sačinjenog iz veoma raznovrsnih cjelina, u kome svaki element predstavlja to što jeste samo u odnosu na druge dijelove cjeline. Podcjeline su integrisane u složenije cjeline višeg reda. Prirodni sistemi su u neprekidnom stanju aktivnosti, razmjene energije i informacije sa svojom okolinom, koja je takođe dio sistema na određenom nivou.

Kompleksnost prirodnih struktura ne može se reducirati na jednostavna svojstva ili elementarne dijelove, na pojednostavljene zakonitosti i odvojene kategorije. Granice pojedinih ekosistema nisu jasno odredive, jer su svi podsistemi integrirani u složene ekološke komplekse višeg reda. Kao rezultat složenih procesa, prirodni oblici predstavljaju neprestano promjenjivi sadržaj, sačinjeni od različitih elemenata, čineći veoma kompleksne vizualne strukture, uključujući veliku raznovrsnost i bezbrojne varijacije bez strogo određenih međusobnih granica.

Prirodni oblici su nelinearne, otvorene strukture, koje su u neprestanom razvojnom procesu rasta ili razgradnje, mijenjajući se kroz prostorno-vremenske forme, u neprestanoj cikličnoj dinamici. Ne samo žive forme, već i forme geoloških oblika – planina, rijeka, geoloških pejzaža, mijenjaju se pod utjecajem različitih sila i prirodnih procesa.

U novije vrijeme ekologija se okreće problemima nestabilnosti različitih prostorno-vremenskih skala geološkog pejzaža, kao "paradigmi nestabilnosti".⁵⁵ Ekologija haosa istražuje procese koji determiniraju uzorce pejzaža na različitim skalamama, uvodeći u ekologiju interesovanje za novu oblast geometrije, fraktalnu geometriju, koja se veže uz teoriju haosa.

⁵⁵ W. M. Adams. *Future nature*. Earthscan publications, London, 1966. pp. 88-89.



Slika 65.

Nelinearne strukture prirodnih geoloških formacija.

Satelitski snimak područje Alpa, Google Maps.

Prirodni prostor je u neprestanom procesu nastajanja, razvoja i razgradnje, kao neprestane promjene, bez obzira da li se radi o njegovim živim ili neživim strukturama, o obali mora ili o šumskom predjelu. Samo-regulacija i samo-organizacija karakteriziraju prirodne sisteme, koji ravnotežu održavaju kroz složene dinamičke procese. Ovo su veoma osjetljivi sistemi ravnoteže, koje i najmanji utjecaj okoline može narušiti, ostavljajući trajne posljedice i uzrokujući nepredvidive promjene.

Mnogi prirodni fenomeni u pojedinim slučajevima manifestiraju nepredvidivo, haotično ponašanje. Nepredvidivi (haotični) sistemi u prirodi su npr. klimatski procesi, turbulentna kretanja, disipativni (raspršni) sistemi. Fizikalna teorija haosa proučava dinamiku ovakvih procesa i vezana je uz nove oblasti geometrije kao što je fraktalna geometrija.

4.1.3. Vizualno opažanje prostora i ekološka teorija percepције

Vizualni prostor je kompleksna kategorija, nastao kao sintetička cjelina procesa opažanja. Dinamički karakter opažanja uključuje kompleksne procese prijema i obrade informacija iz spoljnog svijeta. Opažanje nije linearan proces, već se odvija preko različitih nivoa, koji u svojoj ukupnosti daju cjelovitu prostornu predstavu. Iako su vanjski impulsi koji dopiru do optičkih receptora promjenjivi u svakom vremenskom trenutku, opažajni prostor je relativno konstantan, jer je izgrađen na konstantnosti odnosa i gradijenata.

Gibsonova ekološka teorija percepције prostora naglašava da su perceptivni prostor i vizualno opažanje produkti kompleksnih dejstava prirodne sredine.⁵⁶ Ekološka teorija opažanja daje značaj raznovrsnosti i kompleksnosti prirodnih materijala i tekstura, i ulazi njihovih hijerarhijski organiziranih struktura u procesima opažanja prostora. Principi ekološke teorije opažanja obuhvataju kompleksne hijerarhijske nivoje aktivnosti koji uključuju transformacije optičkog rasporeda na različitim nivoima složenosti, kao ekoloških invarijanti sve višeg nivoa.

Vizualne strukture nisu zatvorene, već su otvorene i kompleksne strukture koje obuhvataju sve razlike, promjene i nepredvidivosti prirodnih prostornih oblika i procesa. Vizualni prostorni oblici nisu izolovani i odvojeni, već su međusobno ovisni i utiču jedan na drugoga, mijenjajući se ovisno o relacionim djelovanjima i utjecajima okoline.

⁵⁶ James, J. Gibson. *The ecological approach to visual perception*. Psychology Press, Taylor & Francis Group, New York, 1986.

Ekološka teorija percepcije nadilazi percepciju kroz tri linearne prostorne dimenzije, perceptivna prostorna dubina nije samo linearni dodatak dvodimenzionalnom prostoru, a vrijeme nije samo njegova četvrta dimenzija. U ekološkom prostoru geometrijska ravan je zamijenjena sa površinom koja ima teksturu, a prostor postaje medij percepcije koji prenosi svjetlosne informacije.

U klasičnom geometrijskom prostoru i ravan i prostor su homogeni dok je u ekološkom prostoru površina heterogena, strukturirana kroz više nivoa i kao takva omogućava percipiranje svjetlosnog optičkog poretka koji prenosi vizualne informacije. Percepcija objekata i njihove okoline rezultanta je odnosa varijantnih i invarijantnih svojstava struktura optičkog svjetlosnog poretka.

Odnos varijantnih i invarijantnih informacijskih struktura po Gibsonu omogućava percipiranje prostornih odnosa. Percepcija je omogućena dinamičkim karakterom strukturnih promjena optičkog svjetlosnog poretka. Invarijantnost i varijantnost, promjena i permanentnost, konstante i varijable kao konstituenti svake transformacije, svojim odnosom čine optičke svjetlosne transformacije informacijskim strukturama. Invarijantnost postaje evidentna kroz promjene, pa je percepcija određena kao dinamičan tok promjena svjetlosnog poretka a ne kao niz fiksnih slika.⁵⁷

Perceptivne forme registrovane su kao promjene strukture svjetlosnog poretka, obuhvatajući deformacije forme koje izlaze iz okvira klasične euklidske geometrije, kao što su nabiranje i lom, dezintegracija i agregacija, destrukcija i konstrukcija, propadanje i rast forme.⁵⁸

⁵⁷ James, J. Gibson. *The ecological approach to visual perception*. 1986. pp. 73- 75.

⁵⁸ Ibid. p. 110.

Ove promjene nisu samo prostorne već i temporalne, kao sekvence događaja koji su ireverzibilni, sadržavajući uz ponovljive i neponovljive promjene, na više temporalnih međusobno prožimajućih skala.⁵⁹

Optičke transformacije obuhvataju permutacije i fluktuacije, tranzicije, supstitucije ili disipaciju, dezintegraciju i evaporaciju strukturalnih uzoraka svjetlosnog poretka kao organizirane informacijske strukture. Ove transformacije specificiraju kompleksne varijante površinskih tekstura koje daju informacije o prostornim relacijama i dubinama, vidljivim i nevidljivim površinama, pokretnim i nepokretnim, udaljenim i bliskim, čvrstim ili fluidnim formama.⁶⁰



Slika 66.
Vizualna kompleksnost
prirodnih materijala i tekstura.

⁵⁹ Ibid. pp. 100-101.

⁶⁰ Ibid. pp. 107-109.

Svijet prirodne okoline nije moguće analizirati pomoću neke odgovarajuće elementarne jedinice, jer je strukturiran na različitim nivoima skala veličina koje su ugniježđene međusobno, tako da čine preklapajuće hijerarhijske strukture. Jedinica kojom se opisuje okolina ovisi o nivou okoline koja je odabrana za opis. Teksture u prirodnoj okolini kao što su zrna pjeska, šljunak ili vlati trave, međusobno sličnih skala veličine, predstavljaju prirodne jedinice mjere.

Percepcija okoline zasnovana na ekstrakciji invarijanti iz toka svjetlosnog strukturnog poretku po Gibsonu ne zahtijeva prethodno znanje ili ideju okoline da bila opažena zajedno sa svješću posmatrača o njegovom položaju u njoj. Ova teorija naziva se direktnom teorijom opažanja, jer nije bilo moguće naći odgovarajući logičko-matematski model kojim bi složeni strukturni sistemi stimulansa iz vanjske sredine bili obuhvaćeni kao mentalne logičke strukture.

Direktna teorija opažanja, baveći se proučavanjem strukturacije informacija iz vanjske sredine, ukazala je na neophodnost definiranja odgovarajućeg matematsko-geometrijskog modela koji bi obuhvatio složene nivoe prirodnih informaciono - oblikovnih struktura. Strukturalna i transformacijska invarijantnost vizualnih oblika odgovara pojmu konstantnosti opažanja, uključujući informacijske sisteme koji se protežu u vremenu.

Po Gibsonu ekološka percepcija se ne oslanja na sliku okoline kao njene kopije, kao ni na jednostavne odrednice oblika kao njihovih linearnih projekcija. Iako se neki oblici percepcije mogu svesti na geometrijske zakonitosti obuhvatajući topološka i projektivna svojstva percipiranih formi, percepcija obuhvata i mnoge principe koji nadilaze poznate i istražene geometrijske relacije.

Teorija opažanja traga za geometrijom koja bi dala opis transformacija koje prezentiraju invarijante koje obezbjeđuju konstantnost objekata i oblika koji se mijenjaju kroz kompleksne oblike transformacija.

Po Koraću se uz ekološku teoriju opažanja vezuje problem: "*Osnovni problem ovakvog pristupa opažanju se time svodi na traganje za geometrijom koja nam nudi precizan opis invarijanti na kojima se zasniva opažanje oblika,... Koja geometrija nam nudi transformacijska pravila koja čuvaju informaciju oblika*"⁶¹

Po Gombrichu⁶² svako predstavljanje je uvijek kreacija, jer zahtijeva pronalaženje odgovarajućeg korespondentnog modela koji će posredovati cjelovitost nekog aspekta stvarnosti, pa tako i vizualnog doživljaja.

Geometrijski strukturni model koji bi posredovao kvalitete, a ne samo kvantitete vizualnog prostora, mora uključivati i sve oblike transformacija kao invarijante promjena determinirane varijabilnim informacijskim dinamičkim tokom. Geometrijski sistem koji bi predstavljao osnovni strukturni model vizualnog prostora, ne može biti zatvorenog tipa, već mora predstavljati otvorenu dinamičku strukturu, kompleksnog karaktera.

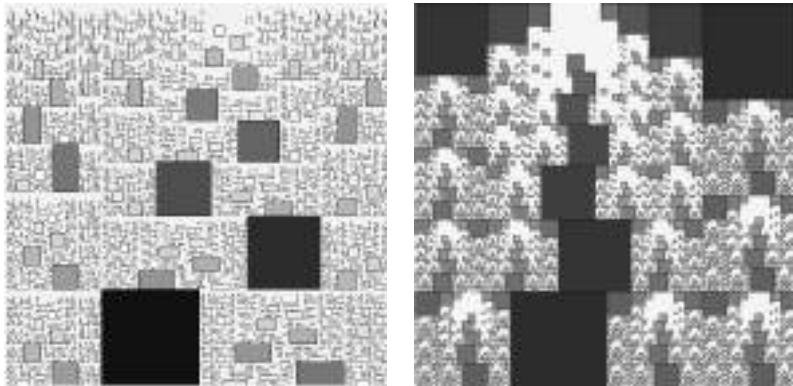
Modularna teorija percepcije uvodi kompjutersku metaforu u perceptivno procesiranje informacija.⁶³ Perceptivni moduli definirani su kao kompjutacijski sistemi koji su hijerarhijski ustrojeni. Algoritamskim procesiranjem na osnovu skupa instrukcija (pod nekim programom), perceptivne informacije se reprezentiraju kao formalni sistemi.

⁶¹ Žarko, Korać. *Razvoj psihologije opažanja*. Nolit, Beograd, 1985. cit. p.158.

⁶² Ernest, Gombrich. *Umetnost i iluzija, Psihologija slikovnog predstavljanja*. Nolit, Beograd, 1984.

⁶³ Snježana, Prijić. *Oko i svijet, Teorije percepcije i dilema realizam-antirealizam*. Hrvatski kulturni dom, Rijeka, 1995. pp. 64-88.

Povezivanjem percepcije uz teoriju informacija, pojavljuju se novi dinamički modeli koji mogu reprezentirati perceptivne procese, omogućavajući bolje razumijevanje ovi fundamentalnih procesa bez kojih je nezamisliv dalji razvoj informacijske tehnologije.



*Slika 67.
Perceptivni procesi strukturalnih transformacija mogu biti reprezentirani novim dinamičkim geometrijskim modelima.
Reprezentacija transformacija fraktalne geometrije.*

Mnoga pitanja u teoriji opažanja ostaju otvorena, zahtijevajući kompleksnije i cjelovitije pristupe, koji obuhvataju i organizam koji opaža i spoljni svijet kao izvor informacija i stimulacija. Vizualni prostor kao primarna opažajna kategorija, predstavlja kompleksnu informacijsku strukturu dinamičkog karaktera, čije karakteristike mogu biti predstavljene u nekom odgovarajućem korespondentnom sistemskom informacijskom modelu. Novi matematički i geometrijski modeli kompleksnog dinamičkog karaktera, mogu biti osnova istraživanja aspekata vizualne percepcije i vizualnog prostora koji su ostali neistraženi, povezujući realni i apstraktни prostor, geometrijski i opažajni, prirodni i artificijelni, integrисани u jedinstven sistem kao okolina u kojoj čovjek živi i interaktivno djeluje.

4.2. KOMPLEKSNI DINAMIČKI SISTEMI

Sredinom 20. stoljeća razvija se sistemska teorija i uz nju sistemski naučni pristup. Sistemskim pristupom pojave se posmatraju kao cjeline, koje se ne mogu rastaviti na elemente bez gubljenja nekih osnovnih svojstava. Biolog Ludwig von Bertalanffy koji je postavio Generalnu teoriju sistema 1968. god. fokusira se na principe uređenja i relacije između dijelova sistema koji ih povezuju u cjelinu. On sistem definira kao kompleks elemenata u interakciji. U nekom kompleksu koji čine posebni elementi, tri osnovna svojstva su broj elemenata, njihove vrste i relacije.⁶⁴

Cjelina je definirana kao sistem koji čine uzajamno povezani elementi, koji takođe mogu biti složeni podsistemi. Ovi elementi posmatraju se u okviru cjeline, čija se svojstva ne mogu objasniti karakteristikama dijelova, što predstavlja novi pristup proučavanju složenih fenomena u odnosu na klasični naučni analitički pristup.

Teorija sistema predstavlja transdisciplinarne studije različitih organizacija i fenomena, nezavisno o njihovoј supstanci. Teorija sistema povezuje koncepte i principe organizacije različitih prirodnih i apstraktnih sistema, povezujući različite grane nauke. Sistemi mogu biti jednostavni i složeni, zatvoreni i otvoreni, statični i dinamični, apstraktni ili realni-materijalni.

⁶⁴ Ludwig, von Bertalanffy. *General System Theory, Foundations, Development, Applications*. George Brazillier, New York, 1968. p. 54.

Teorija sistema je nastala iz potrebe za izučavanjem složenih otvorenih dinamičkih prirodnih sistema, pa je iz nje proizašla nauka o kompleksnim dinamičkim sistemima, usmjerena ka proučavanju sistema koji svoju analogiju imaju u mnogim prirodnim procesima.

Prirodni sistemi, kao otvoreni sistemi koji razmjenjuju energiju i materiju sa svojom okolinom, predstavljaju kompleksno uređene samoorganizirajuće sinergijske sisteme. Kompleksnost prirodnih sistema ne može se svesti na jednostavne elemente i odnose, jer svojstva ovih sistema proizilaze iz svojstava unutarnjeg povezivanja, kao i interakcije s vanjskom okolinom.

Mehaničko-redukcionistička organizacija u prirodnim sistemima zamijenjena je holističkom organizacijom, koja ne dozvoljava raščlanjivanje pojave i procesa na izolovane dijelove. Koncept holističke organizacije primijenjen je u naučnim teorijama kao što su sistemska teorija, kibernetika, holistička medicina, geštalt psihologija i ekologija. Ovim konceptom obuhvaćeni su kompleksni odnosi uzajamno povezanih dijelova koji čine jedinstvenu cjelinu, koja je organizirana kao hijerarhijski sklop nadopunjavajućih nivoa organizacije, gdje je svaki nivo produkt prethodnoga i ishodište slijedećega, u jedinstvu neprekinute cjelovitosti.

Primjena teorije sistema provlači se kroz različita područja, od računarske tehnologije do inženjerstva, ekologije, menadžmenta ili psihologije. Posebno područje predstavlja teorija kompleksnih dinamičkih sistema, praćena razvojem apstraktnih dinamičkih informacijskih modela.

4.2.1. Haotični procesi i nelinearni dinamički sistemi

Fenomeni u prirodnom, fizikalnom svijetu ne mogu biti obuhvaćeni samo ravnotežnim, zatvorenim sistemima. Mnogi prirodni sistemi predstavljaju aktivne, otvorene, neravnotežne strukture. Stabilna stanja u prirodi su rijetka i nepostojana. Savremena fizika se sve više bavi ovakvim nestabilnim stanjima, koja se nazivaju i haotičnim. Pojam haosa kao neuređenog, stanja, bez forme i strukture, obuhvata procese koji su nepredvidivi i nestalni.⁶⁵

Teorija haosa proučava postojanje određenih zakonitosti i u stanjima materije daleko od ravnoteže. Haotična dinamika predstavlja veoma složenu vrstu kretanja, koje ne mora dolaziti od komplikovanih uzroka, već je posljedica izuzetne osjetljivosti sistema. Jednostavni procesi mogu voditi veoma kompleksnom ponašanju dinamičkih sistema.

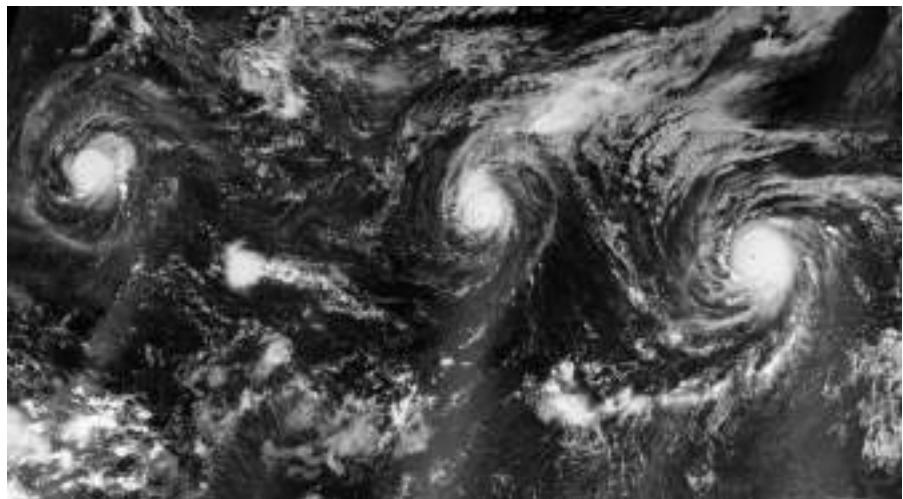
Haotični fizikalni sistemi su takvi sistemi kod kojih stanje sistema nije predvidivo, jer male razlike u početnim uslovima proizvode veoma velike razlike u dugoročnom ponašanju. Sve ovakve sisteme odlikuje izuzetna ovisnost o početnim uslovima. Pokušaj predviđanja ponašanja ovakvih sistema zahtijevao bi detaljno poznavanje svih detalja početnih uslova, što u prirodnom okruženju nije često moguće utvrditi, pa su mnogi prirodni fizički sistemi, kao što su npr. klimatski sistemi, na duži rok nepredvidivi. Za ovakve sisteme čija je dinamika ireverzibilna⁶⁶, karakteristična su stanja koja su daleko od ravnoteže, te se ovakvi sistemi nazivaju sistemima nestabilnog ekvilibrijuma.

⁶⁵ Michael, Field. Martin, Golubitsky. *Symmetry in chaos: a search for pattern in mathematics, art, and nature*. Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM), Philadelphia, 2009. p. 10.

⁶⁶ Ireverzibilnost je svojstvo nemogućnosti jednostavnog povratka u prethodno stanje.

Teorija haosa na određen način redefinira pojmove reda, slučajnosti i predvidivosti. Naizgled slučajna ponašanja mogu proizaći iz uređenih determinističkih sistema, čija ponašanja mogu postati nepredvidiva na duži period uslijed osjetljivosti na početne uslove. Iako se ne mogu predvidjeti detalji ponašanja haotičnih sistema, različiti haotični, neuređeni, nepredvidivi sistemi na jednom globalnom višem nivou mogu posjedovati neka univerzalna svojstva.⁶⁷

Teorija haosa obuhvata mnoštvo prirodnih i artificijelnih sistema, dajući novu platformu za proučavanje nepredvidivih dinamičkih sistema, od prirodnih, klimatskih, populacijskih do socijalnih društvenih procesa.



Slika 68.
Turbulentna dinamika klimatskih procesa kao područje proučavanja teorije haosa.

⁶⁷ Melanie, Mitchell. *Complexity: a guided tour*. Oxford University Press, 2009. p. 38.

Nelinearni dinamički sistemi, za razliku od linearnih koji uglavnom imaju jednu tačku ravnoteže, mogu postići više različitih ravnotežnih stanja, koja ne moraju biti predstavljena tačkama već i određenim trajektorijama. Prelazak iz jednog ravnotežnog stanja u drugo može biti uzrokovani nekim vanjskim utjecajem, koji sistem dovodi u stanje trenutne neravnoteže, tzv. bifurkacijske tačke, iz koga sistem naglo prelazi u ponovnu ravnotežu, ali potpuno transformisan.

U stanjima nestabilnosti, u kojima ovakvi sistemi gube uređenu strukturu (što može biti uslijed utjecaja izvan sistema), dolazi do nepredvidivih stanja, u kojima sistem na određen način sam "bira" određenu vrstu promjene kojom se sistem ponovno dovodi u stanje uređenosti, koje se razlikuje od prethodnog, te time kreira svoj novi oblik organizacije.

U nekim slučajevima, i u stanjima daleko od ravnoteže, dinamički sistemi kao što su mnogi fizički i hemijski, organski i biološki, kognitivni ili socijalni sistemi, kroz procese spontane organizacije mogu manifestirati svojstva kao što su održavanje i uspostavljanje reda u hijerarhijski organiziranim prostorno-vremenskim nivoima, što se može obuhvatiti pojmom samoorganiziranja. Ovakvi sistemi su prostorno-vremenski aktivni i odlikuje ih ponašanje cijelog sistema kao organizirane cjeline.

Pojam samoorganizacije razrađen je još u radovima Von Foerster⁶⁸ i Ashby⁶⁹ 60-tih godina 20. st. uporedno sa razvojem kibernetike i začetaka umjetne inteligencije. Uz pojam organizacije Ashby povezuje pojmove komunikacije i adaptacije. Organizacija je suprotnost redukciji i svodenju sistema na jednu varijablu podrazumijevajući funkcionalnu uslovljenošć višestrukih varijabli i date okvire ograničenog prostora vjerovatnoće.

⁶⁸ Heinz, von Foerster. On Self-Organizing Systems and Their Environments, u M. C. Yovits , S. Cameron. eds. *Self-Organizing Systems*. Pergamon Press, London, 1960. pp. 31–50.

⁶⁹ W. Ross, Ashby. Principles of the self-organizing system, u H. Von Foerster, G. W. Zopf, Jr. (eds.), *Principles of Self-Organization: Transactions of the University of Illinois Symposium*. Pergamon Press, London, 1962. pp. 255-278.

Samoorganizacija obuhvata promjene sistema od neorganiziranog do organiziranog stanja, ali i promjene od jednostavnijih ka složenijim nivoima organizacije.⁷⁰

Pojam samoorganizirajućeg sistema uključuje ne samo određen sistem karakterističnih svojstava već i njegovu okolinu, jer bez interakcije sistema s okolinom nema ni samo-organizaciju, koja je svojstvo sistema da održava svoju unutarnju organizaciju stabilnom na račun okoline iz koje crpi energiju i red.⁷¹ Samoorganizirajući sistemi na račun svoje okoline reduciraju entropiju i degradaciju težeći ka stanju ekvilibrijuma - kao atraktora u kome je sistem otporan na poremećaje iz okoline. Samoorganizirajući sistemi su većinom nelinearni, što znači da imaju više atraktora. Fluktuacije sistema u području između atraktora čine kompleksnu i nepredvidivu dinamiku.⁷²

Sistem brže prelazi u stanje samo-organizacije kroz povećane slučajne poremećaje, prolazeći brže kroz prostor mogućih stanja ka ravnotežnom stanju.⁷³ Unutar fluktuacija između stanja ravnoteže, tačaka nestabilnosti i stanja haotične neravnoteže, ovakvi sistemi manifestiraju dinamičku ravnotežu kojom se ocrtava razvojni put sistema, kroz determinirana stanja, nestabilna stanja i slučajna stanja, uz ponovnu uspostavu ravnoteže na novom nivou. Za razliku od mehaničkih ili termodinamičkih sistema samoorganizirajući sistemi izloženi slučajnim procesima iz okoline povećavaju svoje kapacitete stvaranja reda.

⁷⁰ Ibid. pp. 255-278.

⁷¹ H. Von Foerster. On Self-Organizing Systems and Their Environments, 1960. pp. 31-50.

⁷² Francis, Heylighen. The Science Of Self-Organization And Adaptivity, The Encyclopedia of Life Support Systems. vol 5/3, 2001. pp. 253-280.

⁷³ H. Von Foerster. On Self-Organizing Systems and Their Environments, 1960. pp. 31-50.

Da bi postigao stepen višeg reda, sistem se može ponašati na više načina: ili tzv. stvaranjem reda iz reda, gdje sistem ekspandira uvodeći kompatibilne elemente u svoju strukturu, ili tzv. stvaranjem reda iz haosa ili nereda gdje se vanjski poremećaji inkorporiraju u strukturu sistema stvarajući varijabilna nova stanja reda.⁷⁴

Princip samo-organizacije vezuje se za dinamičke sisteme kod kojih globalna uređenost izrasta iz lokalnih interakcija elemenata sistema. Komponente sistema su u određenoj mjeri autonomne, ali njihove uzajamne relacije proizvode generalno ponašanje koje se ne može izvesti samo iz individualnih aktivnosti i lokalnih zakona interakcije.

Elementi samoorganizirajućih sistema mogu biti podsistemi koji su u korelaciji, koja postaje jača što je sistem dalje od stanja ravnoteže. Najjače su veze susjednih konfiguracija, gdje su veze distribuirane lokalno, prožimajući cijeli sistem, bez centralne kontrole. Rezultanta individualnih interakcija nije rezultat centralizirane kontrole, već je distribuirana kao emergenti generalni uzorak ponašanja komponenti sistema, čime se iz jednostavnih lokalnih pravila uređenosti mogu proizvesti veoma kompleksni generalni strukturalni obrasci ponašanja sistema.⁷⁵

Princip emergencije povezan je uz pojam samoorganizacije, kada se karakteristike cjelokupnog sistema ne mogu izvesti iz znanja o komponentama. Emergentni sistemi sastoje se iz većeg broja dijelova koji svojom interakcijom stvaraju cjelinu određenu ne samo svojstvima dijelova ili njihovog povezivanja, već i kvantitetom i kvalitetom interakcija i sinhronizacije procesa među dijelovima.

⁷⁴ Francis, Heylighen. The Science Of Self-Organization And Adaptivity, 2001. pp. 253-280.

⁷⁵ Ibid. pp. 253-280.

Emergentnost je klasičan koncept u sistemskoj teoriji, koji označava princip da globalna svojstva koja definiraju sisteme višeg reda ili "cjeline" ne mogu biti reducirani na svojstva subsistema nižeg reda ili "dijelova".⁷⁶ Lokalna ponašanja elemenata sistema rezultiraju globalnim stanjima čije su karakteristike ne mogu definirati na osnovu poznavanja stanja jedinki.

Emergentni princip, karakterističan za organske sisteme, u savremenoj nauci proširuje se i na ponašanje neorganskih sistema, povezujući tako žive i nežive, prirodne i apstraktne dinamičke strukture. Time se uspostavlja jedinstvena slika dinamičkih fenomena, rušeći strogo povučene granice organskog i neorganskog svijeta, otvarajući mnoga područja nauke novim, jedinstvenijim i cjelovitijim pristupima.



Slika 69.

Princip samoorganiziranja i emergencije - dinamika jata ptica.

Dinamika jata je bazirana na principima decentralizirane samoorganizacije, gdje lokalno ponašanje individua rezultira globalnim emergentnim stanjima jata.

⁷⁶ Francis, Heylighen. Self-Organization, Emergence and the Architecture of Complexity, in Proceedings of the 1st European Conference on System Science, AFCET, 1989. pp. 23-32.

Emergencija je povezana uz hijerarhijske višeslojne sisteme, tako da cjeline na jednom nivou postaju komponente emergentnog sistema višeg nivoa. Sistem zadržava identitet kroz različita struktura stanja, održavajući unutarnju organizaciju kao invarijantu diferenciranja od okoline.⁷⁷

Mnogi haotični procesi pokazuju svojstva emergencije, jer se iz determinističkih zakonitosti ponašanja elementarnih dijelova sistema ne mogu izvesti karakteristike globalnog ponašanja sistema. Svojstva emergentnih sistema su često ovisna o skali ili nivou posmatranja. Određeni emergenti sistemi pokazuju veći ili manji utjecaj karakteristika elemenata sistema u okviru globalne cjeline, pa se razlikuju slaba i jaka emergencija. Jaka emergencija podrazumijeva nesvodivost globalnog sistema na reducirane dijelove.⁷⁸ Svojstva emergentnih sistema postaju kompleksnija u razmjeru sa brojem elemenata sistema i njihovih veza.

Pojmovi samoorganizacije i emergencije su usko vezani uz specifične sisteme koji se izučavaju pod nazivom kompleksni dinamički sistemi. Proučavanje nelinearnih dinamičkih sistema koji nisu predvidivi jednostavnim analitičkim modelima i koji manifestiraju složenije strukturalne obrasce rezultira novom teoretskom oblasti koja obuhvata veoma široko područje, pod nazivom "teorija kompleksnosti". Teorija kompleksnosti proučava kompleksne, nelinearne, samoorganizirajuće i adaptabilne dinamičke sisteme, kako prirodne tako i artificijelne, od bioloških i socioloških nauka do kibernetike i vještačke inteligencije.

⁷⁷ Heylighen, Francis , Self-Organization, Emergence and the Architecture of Complexity, 1989. pp. 23-32.

⁷⁸ Ibid.

4.2.2. Kompleksni dinamički adaptabilni sistemi

Nauka o kompleksnim dinamičkim sistemima se bavi proučavanjem složenih samoorganizirajućih sistema, uključujući haotičnu dinamiku, kako prirodni tako i umjetni život i inteligenciju, te računarsko modeliranje i simulaciju ovih sistema. Pod pojmom "nauke o kompleksnosti", objedinjene su različite oblasti, proučavajući sisteme koji se ne mogu reprezentirati klasičnim determinističkim modelima.

Područja savremene nauke kroz koja se proteže primjena teorije kompleksnih sistema sve su šira, od kojih se mogu navesti kao najkarakterističnije: teorija determinističkog haosa; kibernetika i genetičko programiranje, vještačka inteligencija, sociologija i ekologija.

Kompleksni sistemi se mogu definirati kao "sistemi u kojim mreža komponenti bez centralne kontrole kroz jednostavna operativna pravila proizvodi složeno kolektivno ponašanje, uz sofisticiranu obradu informacija i adaptaciju kroz učenje ili evoluciju."⁷⁹ Kompleksni sistemi mogu se razlikovati u pojedinačnim slučajevima, ali na općenitijim, apstraktnim nivoima oni pokazuju neke zajedničke osobine i jedinstvene dinamičke principe. Nelinearna dinamika i hijerarhija, samo-organizacija i emergencija glavna su obilježja kompleksnih sistema.

Kompleksni sistemi su sastavljeni iz većeg broja međusobno povezanih dijelova. Cjelovit sistem se ne može opisati samo na osnovu poznavanja svojstava njegovih dijelova. Dijelovi kompleksnih sistema i sami mogu biti kompleksni sistemi na nižem stepenu složenosti, ali organizirani po sličnom principu (samosličnost sistema).

⁷⁹ Melanie, Mitchell. *Complexity, a guided tour*. 2009. p. 13.

Kompleksni dinamički sistemi su otvoreni prema utjecajima iz okoline, koji mogu djelovati na sistem tako da se on kvalitativno mijenja. Veoma su osjetljivi na vanjske utjecaje, koji mogu uzrokovati nepredvidivo, haotično ponašanje i kvalitativnu transformaciju sistema (sistemi nestabilne ravnoteže). Kompleksna kvaliteta otvorenih dinamičkih sistema nastaje u mreži međuvisnih relacija individualnih formi, koje su determinirane lokalnim dinamičkim interakcijama.

Stabilnost kompleksnih sistema ne ostvaruje se statičnim ili ravnotežnim stanjem, već je kompleksnog dinamičkog karaktera. Nestabilnost unutar ovakvih sistema predstavlja izvor reda dinamičkog karaktera, uključujući hijerarhijske organizirajuće nivoe. Usljed njihove interakcije sa okolinom, kompleksni sistemi su u konstantnom procesu dinamičkog razvoja kroz diferencirana prostorno-vremenska stanja.

Kompleksni sistemi se nazivaju sistemima nestabilne ravnoteže, imaju više ravnotežnih stanja, a njihova dinamika se manifestira kao kontinuirani tok između komponenti, tvoreći kaskadu bifurkacija u područjima na granici reda i haosa. Ovi sistemi su izuzetno osjetljivi na promjene u okolini, ali njihova dinamika nije usmjerena ka održanju prethodnog stanja ekilibrijuma poništavanjem perturbacija vanjske okoline, već sistem proizvodi multiplicirane varijabilne konfiguracije, ka sve većoj kompleksnosti, održavajući se na rubu haosa i reda. Dinamika ovakvih sistema usmjerena je ka stvaranju varijabilnih stanja i mnoštva stabilnih stanja koja može da bira.

Dinamika kompleksnih sistema je nelinearnog karaktera jer nije u potpunosti predvidivo njihovo buduće stanje organizacije. Kompleksni dinamički sistemi su definirani kao sistemi na granici haosa i reda po klasičnim standardima, jer ne mogu biti određeni jednostavnim principima uređenosti koji omogućavaju predvidivost budućeg ponašanja.

Kompleksni sistemi pokazuju veliku ovisnost o inicijalnim i graničnim uslovima, za razliku od jednostavnih sistema. Ova ovisnost ili osjetljivost rezultira raznovrsnošću i varijacijama uz nepredvidivost budućeg stanja.

Kompleksnost nastaje kao emergentni proces lokalnih dinamičkih struktura, kroz dinamički razvoj uz preobrazbu cjelovite forme. Transformacije kompleksnih sistema su ireverzibilne, nakon transformacije sistem se teško može vratiti u prethodno stanje. Tokom transformacije kompleksni sistemi se mogu reorganizirati stvarajući neku novu vrstu organizacije (samoorganizacija sistema), koja može biti na jednostavnijem ili često složenijem stepenu od prethodnog stanja, ponekad obuhvatajući elemente i podsisteme koji nisu prethodno bili njihovi sastavni dijelovi (fazna ili meta tranzicija sistema).

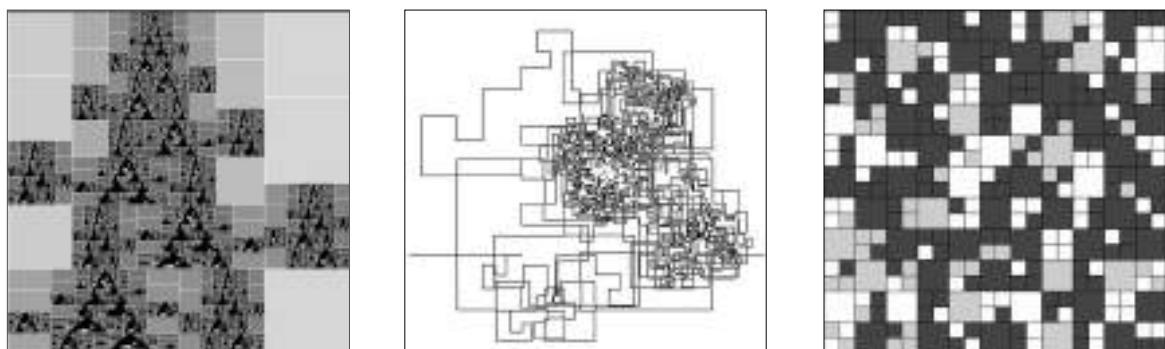
Svojstva kompleksnih sistema su robusnost i fleksibilnost, sposobnost autonomnog funkcioniranja uz minimalnu superviziju i spontani razvoj adaptacije bez potrebe za detaljnim planiranjem, uz ograničene mogućnosti predvidivosti i kontrole.⁸⁰

Adaptacija na okolinu kompleksnih sistema nije samo direktni interaktivni proces, već kompleksni sistemi i sami stvaraju interne modele okoline. Usklađenost internih modela i okoline je jedan od fundamentalnih zahtjeva efikasnog funkcioniranja ovakvih sistema. Modeli moraju biti fleksibilni i otvoreni, i sami adaptabilni. Funkcioniranje kompleksnih sistema na osnovu internih anticipativnih modela dobiva sve veći značaj razvojem područja umjetne inteligencije.

⁸⁰ Francis, Heylighen. The Science Of Self-Organization And Adaptivity. 2001. pp. 253-280.

Iako su evidentne poteškoće u reprezentaciji kompleksnih sistema, računarska tehnologija omogućila je njihovo modeliranje, simulaciju i vizualizaciju putem računarske grafike. Digitalizirana grafika pruža mogućnosti brze i jednostavne grafičke prezentacije veoma velikog broja geometrijskih operacija kao što su: promjena skale veličina, višestruke transformacije, fazne serijacije različitih transformacija, variranje parametara i graduirajuća modulacija.

Iz teorije kompleksnih sistema i njihovih modela proizilazi i novi pristup geometrijskom modeliranju prostora, kroz nove vrste geometrije koje nadilaze klasične prostorne predstave. Informacijski modeli koji su produkt informacijske tehnologije pružaju mogućnost modeliranja, simulacije i interaktivne vizualizacije novih vidova geometrijskog prostora i prostornih formi kao kompleksnih dinamičkih adaptabilnih sistema.



Slika 70.

Vizualizacija kompleksnih geometrijskih struktura kroz različite informacijske modele:

Računarski grafički prikazi bazirani na fraktalnoj geometriji, L-sistemima i celularnim dinamičkim sistemima.

4.3. GEOMETRIJSKO MODELIRANJE KOMPLEKSNIH DINAMIČKIH SISTEMA

Uz predstavu prostora uskladenu s najnovijim naučnim teorijama i otkrićima na područjima kao što su matematika, fizika, psihologija, biologija, informatika i dr., potrebno je detaljnije redefinirati neke postavke i uobičajene pojmove vezane za geometrijsko modeliranje prostora primjenjivo u tehničkoj praksi.

U širem smislu geometriju možemo definirati kao nauku o zakonitostima strukturnog kontinuiteta i transformacije prostornih sistema, koja je u korelaciji s dinamičkim principima aktivne strukturacije koji prožimaju prirodni i materijalni svijet.⁸¹

Geometrija može imati mnogo različitih modela, različitih sistema od kojih svaki reprezentira određene specifične kvalitete prostornih strukturnih relacija i njihovih kvaliteta. Ono što je zajedničko različitim geometrijskim modelima su neki generalni koncepti geometrije, koji imaju svoju specifikaciju u različitim načinima reprezentacije.

Modeli nisu samo prenositelji koncepata i ideja, već postaju aktivan dio poimanja, analitičkog i sintetičkog promišljanja, rezultirajući generalnim uvidima i generativnim principima.

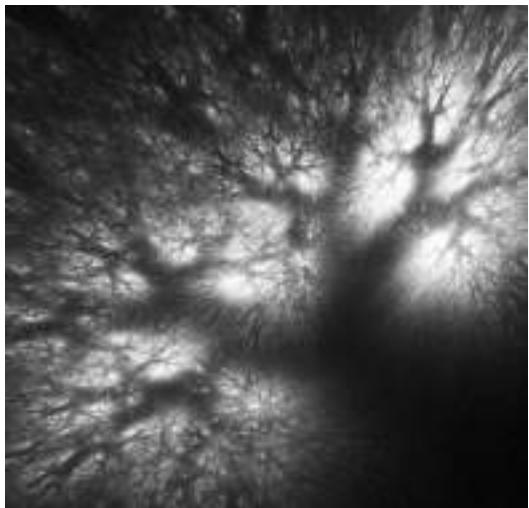
⁸¹ Po Leibnitzovoj definiciji "geometrije kao imanentne strukture stvorenog svijeta i svih logičkih mogućih svjetova", cit. u B. Pavlović. *Filozofija prirode*. 1978. p. 96.

Značaj teoretske osnove nauke o kompleksnim sistemima proizilazi iz proučavanja takvih sistema koje nije moguće modelirati jednostavnim, analitičkim i linearnim modelima. Modeliranje kompleksnih sistema nije jednoznačno određeno jednim generalnim analitičkim ili sintetičkim modelom. Moguće je modeliranje različitih aspekata kompleksnih sistema kroz modele različitog nivoa složenosti, koji reprezentiraju odabrane karakteristike modeliranog sistema.

Kompleksni sistemi mogu biti modelirani ovisno o karakteristikama fenomena koji se proučavaju, na različitim prostornim, temporalnim ili funkcionalnim skalamama. Tako danas imamo različite modele koji imaju za cilj reprezentaciju i simulaciju kompleksnih sistema i njihove dinamike: od frakalne geometrije, L-sistema, celularnih automata, do genetičkih algoritama, tzv. multi-agent modela i "swarm" inteligencije. Ovi modeli iako se razlikuju, imaju i neke zajedničke karakteristika, međusobno se nadopunjavajući.

Geometrijsko modeliranje kompleksne dinamičke predstave prostora zahvata kontinuitet različitih stepena složenosti, u smislu hijerarhijskog multipliciranja skale veličina i dimenzija. U ovakovom prostoru ne postoji jedno objektivno stajalište posmatranja, kao jedan određeni smjer ili tačka. Prostorne forme kompleksnih sistema nastale kao rezultat višestruko djelujućih procesa imaju granajući, odnosno dinamički višeslojni karakter.

Pravila uređenosti neke kompleksne prostorne strukture prenose se kroz različite nivoe složenosti. Iako principi geometrijske uređenosti neke strukture mogu biti jednostavni, kroz razvojnu dinamiku rezultiraju veoma kompleksnim stanjima. Prostor geometrije kompleksnih sistema nema homogenu strukturu kao klasičan geometrijski prostor, pa možemo govoriti o graduiranom nivелiranom prostoru, jer se u njemu pojavljuju skokovi ili nivoi.



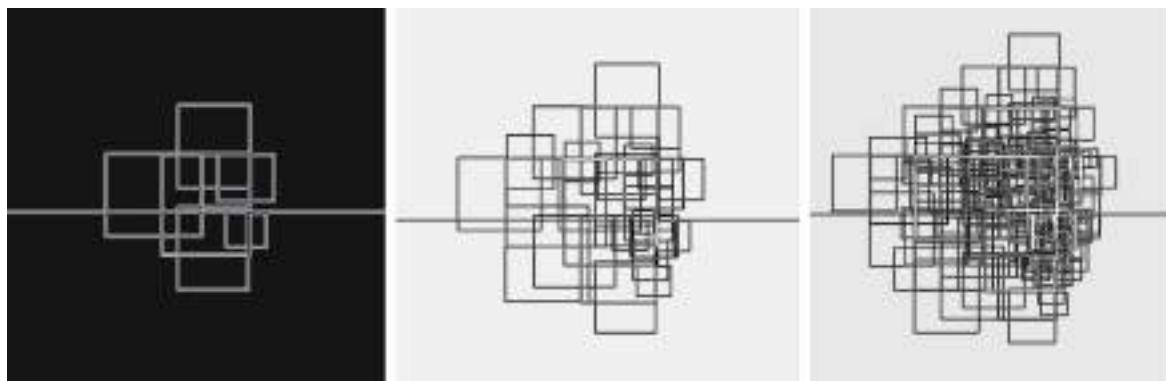
Slika 71.

Hijerarhijski i granajući karakter prostornih formi kompleksnih sistema.

Primjer grafičke vizualizacije fraktalne geometrije.

Svaka geometrijska struktura, različitog stepena složenosti odnosno dimenzije, može biti definirana kao modularna jedinica ili generator transformacija u procesu razvoja kompleksnog sistema. Jedno određeno inicijalno stanje rezultira mnoštvom različitih faznih stanja transformacijskih procesa, ovisno o veoma malim promjenama generirajuće strukture. Svaka minimalna promjena u bilo kojoj fazi, daje veoma različite strukturne varijante u narednim fazama.

Kao rezultat osjetljivosti na male promjene različitih parametara, pojavljuje se izuzetno bogatstvo varijacija kompleksnih formi. Forme geometrije kompleksnosti su promjenjivog oblika, koji predstavlja samo određeni nivo razvojne dinamike. U njoj ne postoji početne ili završne forme (kao savršene), već je svaka forma ishodište prethodnih transformacija i polazište narednih transformacija, kroz postupke rekurzivnih (ponovljenih) transformacija i više sukcesivnih nivoa, rezultirajući sve većom kompleksnošću forme.



Slika 72.
*Razvojna dinamika kroz višestruko niveliirane transformacije forme.
Prikaz sukcesivnog razvoja forme baziran na računarskom
modeliranju vizualnog prikaza.*

Primjenjeni geometrijski modeli po svom suštinskom karakteru predstavljaju modele korespondencije logičkih i čulnih formi, povezujući logičke propozicije i vizualno čitljive konstrukcije. Principi geometrije, kao logički utemeljeni principi strukturacije i transformacije prostornih oblika i formi, direktno su teorijama percepcije vezani uz kognitivne i perceptivne strukture i njihove informacijske potencijale. Povezivanjem vizualnih i logičkih struktura, geometrija ne gubi na preciznosti ili tačnosti (što je jedno vrijeme smatrano u matematici), već dobiva na kompletnosti, cjelovitosti i primjenjivosti. Razvoj novih geometrijskih modela oslonjenih na vizualizaciju putem računarske grafike, vraćaju značaj slikovnoj vizualizaciji geometrije, koja bazirana na kompjutacijskoj determinaciji geometrijskih formi postaje integralnim dijelom novih tipova geometrije. Najznačajniju ulogu u povratku slike u geometriju ima nova vrsta geometrije pod nazivom "Fraktalna geometrija".

4.3.1. Fraktalna geometrija

Razvoj savremene nauke zahtijeva cjelebitiji pristup svim kategorijama stvarnosti, pa se i u matematici događa izvjestan pomak ka povezivanju vizualnih i logičkih struktura utemeljenjem fraktalne geometrije 70-tih god. 20. st. Osnovna ideja Benoita Mandelbrota koji je definirao karakteristike nove vrste geometrije - fraktalne geometrije, je bila vizualizacija kompleksnih matematskih struktura, omogućena razvojem računarske grafike.⁸² Utemeljenost fraktalne geometrije na vizualnom aspektu, na grafičkoj reprezentaciji kao opisu pa i dokazu nekih prostornih zakonitosti, vraća matematiku u oblast vizualno interpretirane geometrije, koja je jedno vrijeme bila prepuštena uglavnom oblastima tehničke prakse. Modeliranje i vizualizacija različitih aspekata kompleksnih prostornih struktura postaju omogućeni kroz informacijske dinamičke modele i računarsku grafiku.

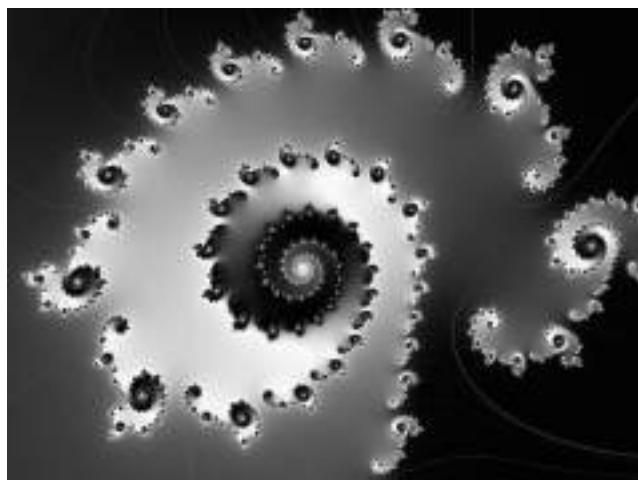
Naziv "fraktalna geometrija", nove grane geometrije koja obuhvata široko područje različitih geometrijskih struktura, potiče od latinske riječi "fractus", što znači razlomljen.⁸³ Utemeljitelj fraktalne geometrije, matematičar Benoit Mandelbrot, označava ovim nazivom geometrijske strukture koje kao osnovna svojstva imaju morfološku kompleksnost, uz nizak sadržaj informacija. Fraktalna geometrija obuhvata one geometrijske strukture koje imaju izvjesna ponavljajuća svojstva kroz određeni stepen veličina. Vizualno veoma kompleksne fraktalne geometrijske strukture kreirane su s nekoliko osnovnih, jednostavnih pravila. Povećanjem bilo kog dijela strukture pokazuje se ista ili slična generalna forma.

⁸² Benoit, Mandelbrot. *The Fractal Geometry of Nature*. W. H. Freeman and Company, New York, 1983. pp. 22-23.

⁸³ Ibid. p. 4.

Fraktalne forme imaju neke karakteristike bitno različite od klasičnih geometrijskih formi. Za razliku od klasičnih geometrijskih formi koje su linearog karaktera, te se povećanjem bilo kog dijela dobije linija, fraktalne forme povećanjem bilo kog dijela pokazuju istu strukturu koju pokazuje i cijela forma. Dok su klasične geometrijske forme građene kao kompozicija odvojenih elemenata, fraktalne forme ukomponirane su od dijelova koji predstavljaju iterativni refleks cjeline.

Fraktalne forme u svojoj vizualnoj strukturi često ne pokazuju uočljivu pravilnost, te izgledaju neuređeno i geometrijski nepravilno. Ne mogu se generalno svesti na određen broj tipičnih, osnovnih formi, jer su mogućnosti varijacija beskonačne.



Slika 73.
Fraktalna geometrijska forma.
Povećanjem se pokazuje refleks cjeline u svakom dijelu.

Forme fraktalne geometrije posjeduju matematička svojstva koja se razlikuju od svojstava euklidske geometrije ili topoloških svojstava forme. Možemo izvršiti osnovnu podjelu na geometrijski definirane i algebarski definirane fraktalne forme, te na determinirane i nedeterminirane fraktale.

Geometrijski determinirane fraktalne forme su rezultanta ponovljenih geometrijskih transformacija i možemo reći da su zadane geometrijskim kodom.

Algebarske fraktalne forme predstavljaju grafički prezentirane osobine algebarskih funkcija, koje imaju povratnu "petlju", te time dobivaju repetitivan karakter. Matematski definirana, deterministička fraktalna geometrija proučava komplikirane podgrupe geometrijski jednostavnih prostora i to one podgrupe "koje su generisane ili posjeduju invarijantne osobine pod jednostavnim transformacijama prostora u samog sebe".⁸⁴

Fraktalne geometrijske strukture nastale su kao ishodi transformacija koje imaju ponavljujući karakter, gdje se rezultat jednog stepena transformacija uzima kao osnova sljedećeg stepena. Geometrijske transformacije koje tretira fraktalna geometrija su transformacije samo-sličnosti, koje se ponavljaju kroz promjenjivi stepen veličina, pa ove transformacije odlikuje invarijantnost skale veličina. Za razliku od klasičnih geometrijskih struktura euklidske geometrije koje se matematski mogu predstaviti jednačinama, fraktalne strukture mogu se analogno matematski predstaviti algoritmima⁸⁵ koji nagnju rekurzivnosti (povratnom ponavljanju).

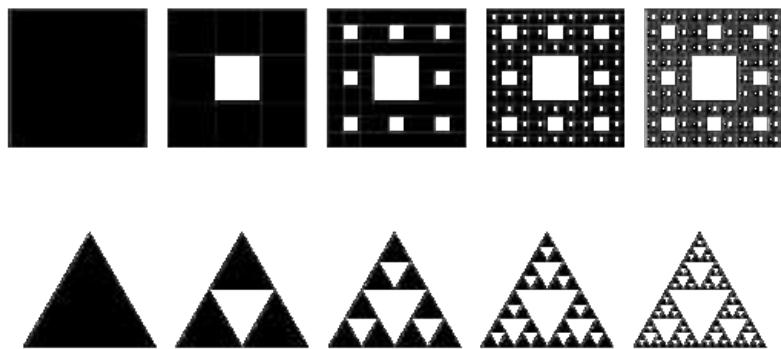
Fraktalne strukture se u 2-dimenzionalnoj euklidskoj ravni, kao ostale geometrijske forme, mogu predstaviti slikom. Za razliku od klasičnih geometrijskih formi koje su predstavljene građenjem složenijih formi od jednostavnijih odvojenih elemenata, fraktalne forme nastaju ponavljanjem određenih geometrijskih procedura, tako da jedna slika predstavlja samo određenu fazu procesa, koji se sastoji od većeg broja razvojnih faza.

⁸⁴ Michael, F.Barnsley. *Fractals Everywhere*. Dover Publication, New York, 2012. p. 42.

⁸⁵ Algoritam predstavlja grupu pravila koja opisuju neki proces, a moguće ga je predstaviti na više načina: riječima, matematskom notacijom, slikom ili nekim kodom.

Iako fraktalna forma može biti definirana jednostavnim kodom, pomoću jednostavnih geometrijskih elemenata i jednostavnih geometrijskih transformacija, slika koja predstavlja ishod ponovljenog procesa, postaje u svakoj fazi sve kompleksnija.

Kao rezultat određenog procesa transformacija, svaka slika u sebi sadrži iterativni refleksijski celine, koji se odražava u određenim podsegmentima slike. Grafičko predstavljanje neke fraktalne strukture obuhvatalo bi za prikazivanje ovakvog iterativnog procesa više sukcesivnih slika, od kojih svaka predstavlja novu razvojnu fazu.

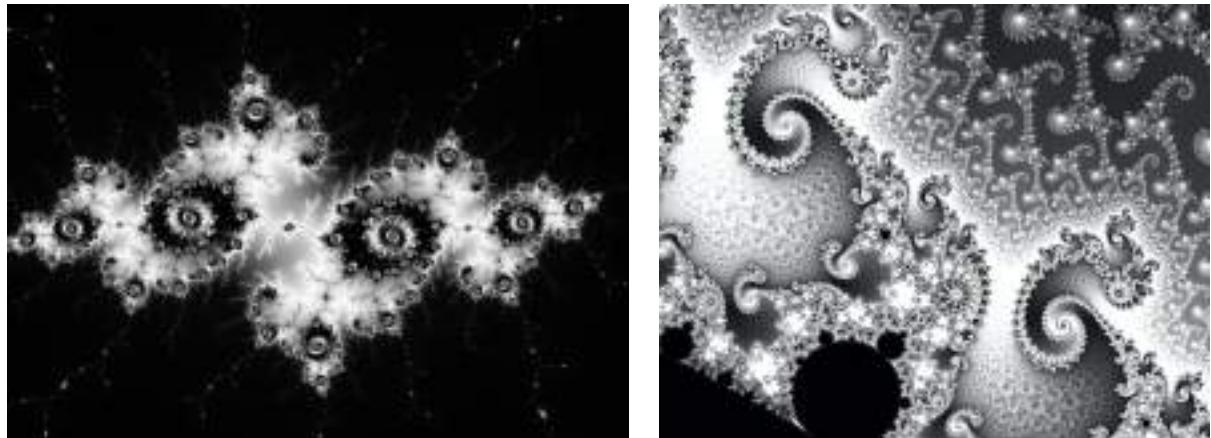


Slika 74.
Razvojne faze fraktalne
forme:
kvadrat i trougao
Serpinskoga.

Klasičnom geometrijskom konstrukcijom nije moguće adekvatno dati grafički vizualni prikaz složenijih razvojnih faza kompleksnih fraktalnih geometrijskih struktura, zbog poteškoća u preciznosti i konstruktivnoj složenosti ovakvih formi. Razvojem informatičke tehnologije i računarske grafike postaje moguća grafička interpretacija mnogobrojnih fraktalnih struktura, njihovih složenijih faza i bezbrojnih varijacija, uz preciznost i očiglednost slike. Grafička interpretacija fraktalne forme može biti statičnog i sinhronijskog ili dinamičkog diahronijskog karaktera ocrtavajući kroz animiranu sliku razvoj forme u vremenu.

Na osnovu određenih algebarskih parametara, moguće je matematički definirati različite fraktalne strukture koje su grafički prezentirane slikom na ekranu pomoću softverskih proceduralnih algoritama. Ove slike nastaju kao ishod mnogobrojnih iteracija nekog zadanog algoritma.

Matematički zadani algebarski parametri daju rezultirajuće strukture u geometrijskom smislu veoma kompleksne morfologije (npr. Julijeve grupe ili Mandelbrotovi fraktali).

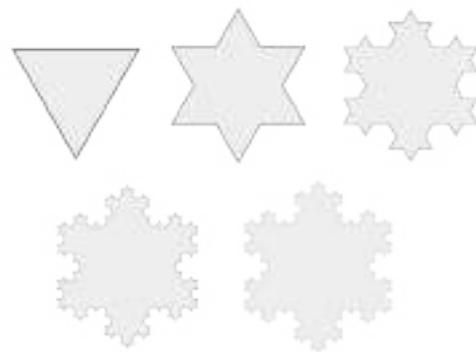
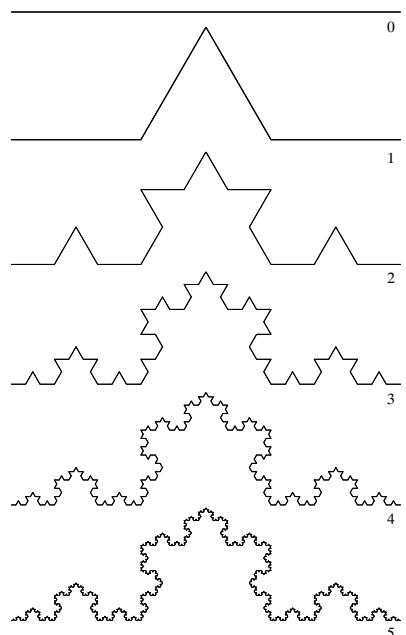


Slika 75.
Algebarske matematske fraktalne strukture kompleksne morfologije.

Fraktalne forme mogu biti date geometrijskim kodom. Fraktalne geometrijske forme koje se odlikuju jednostavnijom morfologijom i strukturno su determinirane jednostavnim procesima transformacije kao geometrijskim kodom (deterministički fraktali), mogu se definirati pomoću postupaka klasične euklidske geometrije kao što su simetrično preslikavanje, rotacija, translacija, uvećanje ili umanjenje.

Postupci geometrijskih transformacija mogu biti zadani nekim računarskim kodom kod koga su geometrijske operacije zadane određenim simbolima, pa se postupak konstrukcije fraktala zadaje slijedom šifriranih algoritamskih procedura.

Determinističke fraktalne geometrijske figure generirane su na osnovu dva polazna elementa koji se nazivaju inicijator i generator. Inicijator je geometrijski lik koji može biti zadan određenim brojem jednakih segmenata, dok je generator predstavljen nizom segmenata kojim sucesivno zamjenjujemo pojedine segmente inicijatora. Kompleksne fraktalne geometrijske forme mogu biti rezultat transformacija jednostavnih geometrijskih figura kao inicijatora - pravca, trougla, kvadrata. Neki "jednostavniji" fraktali zadani su jednim linijskim segmentom kao inicijatorom (Kantorova linija, Kohova kriva...).



Slika 76.
Konstrukcija frakタルnih determinističkih figura kroz ponovljene transformacije:
Kohova kriva i Kohova pahuljica.
inicijator $n=0$,
 $n = 1$ generator.

Fraktalne geometrijske forme mogu biti generirane iz segmenta prave, iz segmenta ravni ili iz trodimenzionalnog prostornog segmenta. Očigledno je da postoji veoma veliki broj različitih tipova fraktalnih struktura, ovisnih o velikom broju inicijalnih i generirajućih parametara, pa je gotovo nemoguće izvršiti sveobuhvatnu sistematizaciju fraktala, jer bi ona zahtijevala beskonačnu listu različitih varijanti i podvarijanti, što ocrtava osnovnu kvalitetu fraktalnih struktura - beskonačnu potpodjelu. Za većinu fraktalnih oblika evidentna je teškoća u identificiranju inicijalnih uslova generiranja kod razvijene forme u višem stepenu razvoja, odnosno jednostavnog analitičkog uvida u sisteme transformacija kojima je neka fraktalna forma definirana.



Slika 77.
Konstrukcija fraktalne forme u faznim transformacijama.
Zmajolika kriva.

Pri mogućoj klasifikaciji fraktalnih formi, ne igraju ulogu pojedinačni detalji i oblici, već neka opšta svojstva. Osnovna generalna svojstva fraktalnih struktura su: skaliranje veličina, samosličnost i fraktalna dimenzija.

4.3.2. Samoslične transformacije i fraktalna simetrija

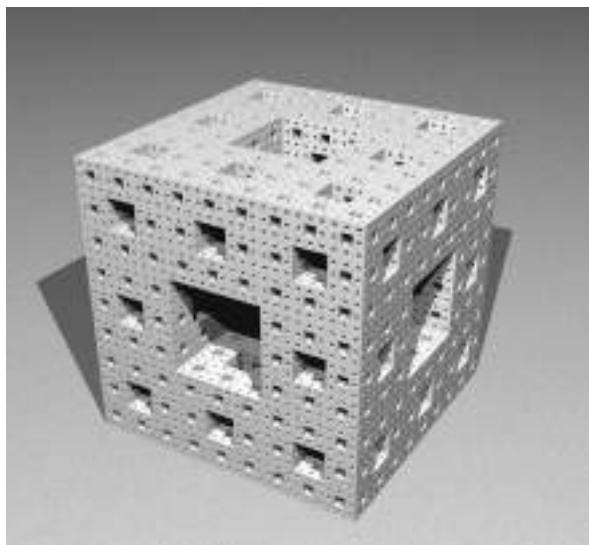
Otkriće fraktalne geometrije ukazuje na postojanje složenijih transformacija, pri kojima se sve klasične geometrijske karakteristike neke figure mijenaju, kao što su oblik i veličina (odnosno mjera ili dimenzija), pa i količina (kao broj elemenata), koje oslikavaju dinamiku kompleksnijeg tipa. Kroz samoslične transformacije primjenjene na svakom dijelu neke figure zadržava se jednakost preko skale veličina.

Osnovna karakteristika frakタルnih formi je procesna dinamika, koja se oslikava u vidu transformacijske modifikacije kroz više nivoa, koji mogu biti određeni različitim prostornim parametrima, kao što su određeni stepeni veličina odnosno dimenzija. Ovi nivoi predstavljaju razvojne stepene datih transformacija koje se ponavljaju, rezultirajući sve složenijim formama. Frakタルne geometrijske forme moguće je predstaviti u klasičnom euklidskom geometrijskom planimetrijskom prostornom modelu u vidu hijerarhijskih razvojnih faza niza transformacija.

Transformacija koja karakterizira frakタルne strukture je transformacija samosličnosti, kao podpodjela neke geometrijske strukture na proporcionalno jednake elemente, koji su podvrgnuti istoj transformaciji. Ovakva transformacija može biti rezultanta većeg broja transformacija koje uključuju transformacije podudarnosti, sličnosti i afine transformacije (npr. rotaciju, klizanje, rastezanje i dr.). Ono što je najbitnije naglasiti je da ovim transformacijama neki segmenti mogu biti isključeni ili dodati, tako da se mijenja broj sličnih dijelova. Mijenaju se kvantitativne vrijednosti geometrijskih figura, što se odražava kao promjena dimenzije i pojava tzv. frakタルne dimenzije.

U fraktalnoj geometriji pojavljuju se takve forme koje pokazuju određenu kompleksnu pravilnost (samosličnost ili fraktalna simetrija). Samosličnost predstavlja transformacije pri kojima se struktura neke geometrijske figure reflektuje u svakom njenom dijelu, što je posljedica aplikacije ponovljenog procesa transformacija definiranog nekim algoritmom. Samosličnost je invarijanta promjena u veličini i predstavlja jedan vid simetričnog preslikavanja. Ovakva simetrija nazvana je skalirajućom simetrijom.

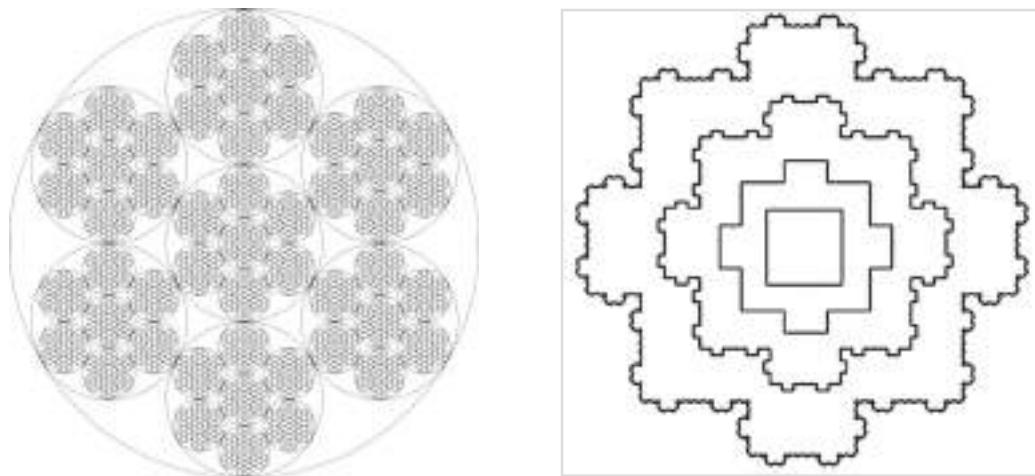
Često se može naići na izraz "fraktalna simetrija", kojim se označava posebna pravilnost fraktalnih formi, povezana uz samoslične transformacije. Ponavljanjem određenih geometrijskih procedura nastaje geometrijska forma koja predstavlja ishod sukcesije transformacija na različitim skalama veličina, kao samosličnih transformacija.



Slika 78.
Mengerova sružva.
Trodimenzionalna fraktalna forma koja posjeduje simetriju samosličnosti.

U transformacije samosličnosti uključen je faktor uvećanja ili umanjenja. Ako je u transformacije uključeno više od jednog faktora uvećanja, transformisane figure su samoafine. Kod ovakvih figura dijelovi i cijelina se mogu dovesti u korespondenciju skaliranjem različitih segmenata različitim faktorima.

Neki jednostavniji principi samosličnosti uočljivi su vizualno s lakoćom, ali se u mnogim slučajevima ne pokazuje jednostavna vizualna uređenost. "Rast", „nastajanje“ ili "razgradnja", prikladni su termini kojim možemo obilježiti karakter transformacija kompleksnih sistema, čiji su ishodišni oblici često uočljivi i u prirodnom svijetu.



Slika 79.
Fraktalne samoslične forme nastale kao ishodi
višestrukih transformacija.
Samoslične forme ocrtavaju dinamiku rasta i razvoja.

4.3.3. Fraktalna dimenzija i skalirajući sistem geometrijske mjere

Iako se često smatra da zakonitosti Euklidske geometrije određuju karakteristike prostora podrazumijevajući njegovu trodimenzionalnost, Mandelbrot skreće pažnju na razliku geometrijske dimenzije kao apstraktne dimenzije i efektivnih dimenzija prirodnog prostora.⁸⁶ Dimenzija u prirodnom prostoru je intuitivna aproksimacija u korelaciji sa stepenom rezolucije posmatranja, što je u skladu sa klasičnom grčkom geometrijom koja ne poznaje absolutnu geometrijsku mjeru.

U prirodnom prostoru dimenzije su percipirane u sekvencama. Primjer koji navodi Mandelbrot, lopta od končanih niti, sa jedne udaljenosti je samo tačka bez dimenzija, sa određene duljine percipira se kao trodimenzionalno tijelo, a sa veće blizine kao jednodimenzionalna nit, koja zatim sa još veće blizine opet postaje trodimenzionalna, ovisno o relaciji objekta i posmatrača.⁸⁷ Sukcesija različitih efektivnih relativnih dimenzija kao tranzicija između definiranih topoloških geometrijskih dimenzija može biti zamijenjena jednim novim modelom geometrije u kome se prostor između topoloških dimenzija manifestira kao fraktalna dimenzija.

Fraktalna dimenzija razlikuje se od dimenzije definirane koordinatnim kartezijanskim osama ali i od topološke dimenzije koja poistovjećuje forme istog topološkog reda. Fraktalna dimenzija uspostavlja razliku između jednakih topoloških dimenzija.⁸⁸

⁸⁶ Benoit, Mandelbrot. *The Fractal Geometry of Nature*. 1983. p. 14.

⁸⁷ Ibid. pp. 17-18.

⁸⁸ Ibid. p. 17.

Dimenzije su u fraktalnoj geometriji definirane kao mjeru kompleksnosti, koja se iskazuje kao dimenzija samosličnosti i relacija skale kompleksnosti u odnosu na skalu povećanja neke forme. Postoji više različitih matematičkih definicija i tipova fraktalne dimenzije, kao faktora kompleksnosti neke forme, koji se u određenim karakterističnim aspektima razlikuju.

U euklidskom geometrijskom prostoru tačka ima dimenziju 0, linija dimenziju 1, površina dimenziju 2 i prostor (tijelo) dimenziju 3. Ove dimenzije protežu se u beskonačnost u jednom, dva ili tri smjera. Za forme euklidske geometrije, dimenzija je parametar koji je ovisan o masi (dužini, površini, volumenu) i linearnej veličini objekta. Dimenzija predstavlja ovisnost mase neke geometrijske forme o njenoj promjeni linearnim uvećanjem ili umanjenjem. Ova ovisnost izražena je kao stepen linearog povećanja (umanjenja) veličine geometrijske forme, u relaciji sa dobivenom povećanom (umanjenom) masom koja se može izraziti i kao broj kopija originalne geometrijske forme.

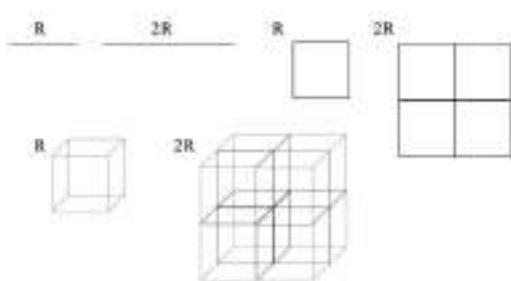
$$M = R^D$$

M - masa

R - razmjer linearog povećanja /umanjenja)

D - dimenzija

Linearno povećanje pravilnih geometrijskih figura, moguće je u jednom, dva ili tri smjera. Za dvostruko linearno povećanje klasičnih geometrijskih formi - linije, kvadrata i kocke dobijemo slijedeće vrijednosti mase i dimenzije:



Linija	$R = 2$	$M = 2$	$2 = 2^1$	$D = 1$
Kvadrat	$R = 2$	$M = 4$	$4 = 2^2$	$D = 2$
Kocka	$R = 2$	$M = 8$	$8 = 2^3$	$D = 3$

Slika 80.

Povećanje mase ovisno o dvostrukom linearnom uvećanju klasičnih geometrijskih formi.

Dimenzija predstavlja jedan od elementarnih kvaliteta euklidskog prostora. Fraktalne geometrijske strukture, međutim, ne pokazuju svojstva karakteristična za klasično poimanje dimenzije. Fraktalne forme ne dozvoljavaju pojednostavljeni predstavljavanje u jednoj od tri "klasične" dimenzije. Za ovakve forme koriste se posebni matematski obrasci za izračunavanje dimenzije samosličnosti.

Dimenzija neke geometrijske strukture govori koliko kopija dobijemo uvećavanjem veličine samosličnih objekata za određeni stepen.

N - broj samo-sličnih dijelova dobivenih povećanjem (umanj.) originalne forme

D - dimenzija

r - faktor linearног uvećanja (umanj.)

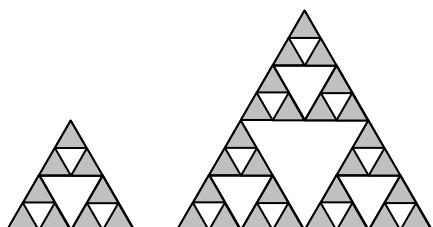
$$r^D = N$$

Dimenzija predstavlja i eksponent uvećavajućeg faktora broja samosličnih dijelova u koje figura može biti razdijeljena. Obrazac za izračunavanje fraktalne dimenzije (Hausdorfova dimenzija) matematički se predstavlja izrazom:

$$D = \frac{\log N}{\log r}$$

Dimenzija fraktalnih formi najčešće se dobije u vidu "razlomljene" klasične dimenzije. Npr. dimenzija trougla Serpinskoga iznosi po ovom obrascu:

$$D_f = \frac{\log 3}{\log 2} = 1,585$$

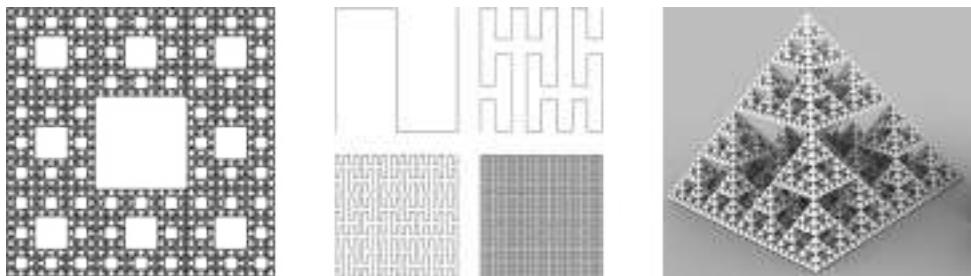


Slika 81.

*Fraktalna dimenzija trougla Serpinskoga.
Dvostrukim povećanjem linearne veličine figura se multiplicira tri puta. Fraktalna dimenzija je manja od dva.*

⁸⁹ Keith, Devlin. Nova zlata doba matematike. Društvo matematikov, fizikov in astronomov, Ljubljana, 1993. p. 79.

Iako fraktalne forme imaju po Mandelbrotovoj definiciji fraktalnu dimenziju veću od topološke dimenzije, mogući su slučajevi gdje je dimenzija linijskih figura, tzv. krivih koje ispunjavaju prostor, jednaka dimenziji 2, iako linija ima topološku dimenziju 1, ili kod prostornih formi koje imaju topološku dimenziju 3 fraktalna dimenzija može biti manja od 3.



Slika 82.

Fraktalna dimenzija frakタルnih geometrijskih formi:

Tepih Serpinskoga, $\log 8 / \log 3$; $D = \log 8 / \log 3 = 1.8928$,

Peano kriva, $D = 2$,

Piramida Serpinskoga, $D = \log 4 / \log 2 = 2$.

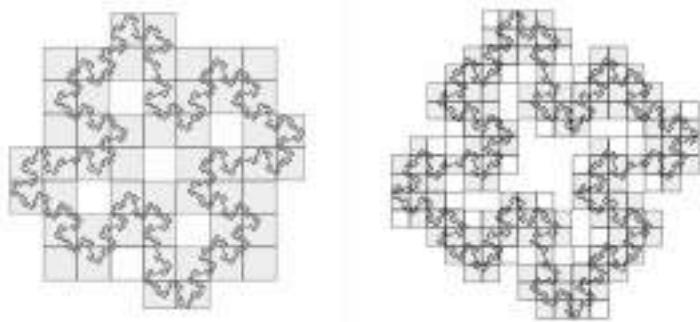
Jedan od načina definiranja dimenzije frakタルnih formi u euklidskom metričkom prostoru je metoda "broja ćelija" (engl. box counting) ili dimenzija sličnosti.⁹⁰ Forma se pokriva mrežom ćelija određene veličine odnosno rezolucije i broji se broj ćelija koje pokrivaju formu ili njenu konturu. (Sl. 84.) Broj ćelija (N) ovisan je o dužini stranica ćelije (r), pa dobivamo broj koji pokriva frakタルnu formu kao $N(r)$. Zatim se dimenzije ćelija smanjuju za određen faktor i ponovno se broje ćelije koje pokrivaju frakタルnu formu. Ova metoda je prikladna za površinske i prostorne frakтале, jer ćelije mogu biti kvadrati ili kocke.

⁹⁰ Benoit, Mandelbrot. *The Fractal Geometry of Nature*. 1983. p. 37.

Metod broja ćelija može se analogno fraktalnoj dimenziji samosličnosti predstaviti formulom:⁹¹

$$D = \frac{\log N}{\log 1/r}$$

Na osnovu ove metode može se naći dijagram fraktalne dimenzije nekog objekta kao mjera njegove kompleksnosti. Odnos broja ćelija koje pokrivaju fraktalnu formu u različitim stepenima veličina mreže ćelija, daje fraktalnu dimenziju.

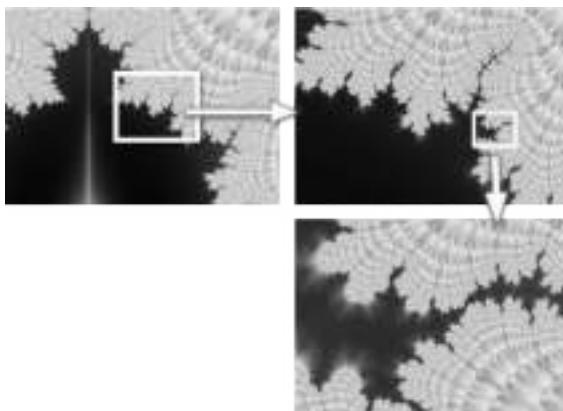


Slika 83.
Fraktalna dimenzija dobivena
pomoću metoda broja ćelija.

Fraktalna geometrija se bavi kompleksnim geometrijskim sistemima koji nemaju karakterističnu skalu veličine. Fraktalne strukture nemaju konačnu dužinu (površinu, volumen), pa možemo reći da se u klasičnom smislu ne mogu izmjeriti. Fraktalni geometrijski model dovodi u pitanje klasične predstave geometrijskih veličina i dimenzija kao fiksnih vrijednosti i uvodi skalirajuće dimenzije i mjere. Fraktalni sistemi koji zahvataju više stepena složenosti neke prostorne strukture, posjeduju i fraktalnu mjeru koja regulira prostorne odnose na kompleksnom dinamičkom nivou, tako da klasičnim mernim sistemima i dimenzijama nije moguće precizno determinirati njihovu veličinu.

⁹¹ Ibid. p. 37.

Kao konkretan primjer u prirodnom svijetu za skaliranje veličina, uzima se primjer dužine morske obale, koja će varirati ovisno o razmjeri karte na kojoj je prikazana, ali zbog kompleksnosti njene konture, konačnu dužinu, mjereći obim sve sitnijih dijelova, precizno je nemoguće izmjeriti. Dužina je ovisna o skali upotrijebljenoj za njenu determinaciju, što znači da nema jedne određene dužine, već ih ima više, ovisnih o skali po kojoj mjerimo.



Slika 84.
Beskonačna skala uvećanja fraktalne geometrijske forme.

Konačnu dužinu konture frakta nije moguće izmjeriti klasičnim linearnim mjernim skalamama.

Neki prostorni parametri kao što su površina, obim, zapremnina, linearnim povećanjem klasičnih geometrijskih figura takođe mijenjaju vrijednosti kontinuirano, dok kod fraktalnih struktura dolazi do diskontinuiranih odstupanja, pa se npr. povećanjem površine umanjuje zapremnina, ili se povećanjem obima smanjuje površina. Beskonačno duga granica fraktalne forme može zatvarati konačnu površinu.

Mjerenje jedne fraktalne geometrijske forme, koja se razvija kroz transformacije u sve kompleksniju strukturu, jednim apsolutnim univerzalnim modulom, postaje nepraktično i neprikladno. Skalirajući modul, koji se i sam razvija kroz različite faze transformacija, postaje prikladniji za izražavanje mjere neke fraktalne strukture.

Klasični parametri geometrijske mjere: dužina, širina, površina, ugao ..., kod razvijene fraktalne forme više ne mogu predstavljati determinirajući sistem, već se može govoriti o relativnoj, skalirajućoj mjeri, koja se razvija kroz sve faze transformacija. Fraktalna geometrija uključuje diferencirane skalirajuće mjerne module koji determiniraju određene prostorne nivoe i smjerove. Fraktalna forma je nelinearna, multidimenzionalna, što znači da nije limitirana na 3 linearne dimenzije klasične geometrije. Pojmovi kao što su "razlomljena" ili međudimenzija, ili nesumjerljivost, rezultat su zadržavanja klasičnog linearog poimanja dimenzije i klasičnih poimanja geometrijskog prostora.

Pojmovi i predstave prostornih dimenzija definirani na jedan kompleksniji način, još u klasičnoj Grčkoj geometriji imaju svoju paralelu u proporcijskim sistemima kao što je "zlatni rez". Ustanovljena je korelacija geometrijske proporcije zlatnog reza i fraktalnih struktura. Zlatni rez odlikuju nesumjerljivost, samosličnost i jedinstvenost kroz sve skale veličina, što predstavlja strukturne karakteristike fraktalnih geometrijskih formi.⁹² Fraktalna geometrija nazvana je "geometrijom prirode" zbog vizualne korelacije prirodnih oblika i fraktalnih formi, ali je očigledno da se ova korelacija proteže i na unutarnje strukturne i proporcione odnose. U proporciji zlatnog reza ocrtava se kompleksna prostorna dinamika organskog rasta i razvoja. Ova proporcija usklađuje odnose dijelova i cjeline bez obzira na njihovu promjenjivost u odnosu na skale veličina.

Problem nesumjerljivosti veličina, još od klasične euklidske geometrije provlači se kao pitanje na koje su odgovori dati nadilaženjem jedne skale hijerarhija i dimenzija, prelaskom na viši nivo. Dio i cjelina postaju hijerarhijski stepeni složenosti, pa se cjelovitost ostvaruje na svakom pojedinom nivou, kao i kroz sve hijerarhijske stepene složenosti.

⁹² Manfred, Schroeder. *Fractals, chaos, power, laws*. W. H. Freeman, New York, 1991. pp. 49-53.

4.3.4. Izomorfost prirodnih i fraktalnih geometrijskih formi

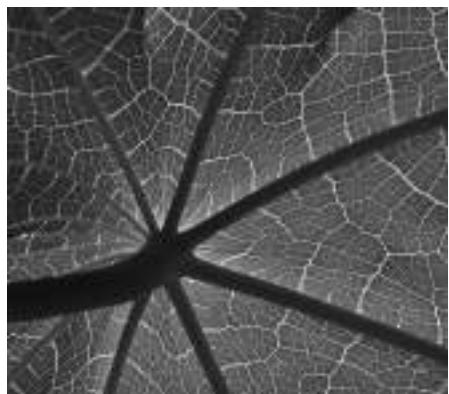
U prirodnoj prostornoj morfologiji ne postoje savršeni geometrijski oblici ili savršene glatke površine. Većinu prirodnih struktura odlikuje kompleksnost i raznolikost oblika. Prirodni sistemi u svojim prostornim formama pokazuju svojstva fraktalnih struktura: strukture cjelina često su reflektovane u njihovim dijelovima.

Prirodni sistemi pokazuju samosličnost na mnogim nivoima skale. Prirodne forme koje sadrže fraktalne principe: grane drveća, planinski vijenci, vodene površine, oblaci ... nastaju kao posljedica jednakih sila koje djeluju na različitim nivoima, kako na dijelove, tako i na cjelinu. Takvo višestruko djelovanje prirodnih procesa očituje se u njihovoj prostornoj strukturi, odnosno u njihovom obliku.

U prirodi se fraktalne forme generiraju na dva načina: ili pod djelovanjem sličnih sila na mnogim nivoima istovremeno, ili na jednom nivou kroz određeni vremenski period tako da možemo govoriti o prirodnim algoritmima koji se odnose na procese formiranja prirodnih prostornih oblika. Fraktalna geometrija je stoga pogodna za modeliranje prirodnih procesa i oblika kao i unutarnje strukture prirodnih formi.

Mnogi prirodni procesi rasta koji naizgled vode ka neuređenim formama posjeduju skalirajuću simetriju - fraktalnu simetriju. U procesima rasta univerzalne postaju fizičke osobine koje zavise samo od skaliranja, tj. zajedničke su sa svakim sistemom koji ima istu fraktalnu simetriju. Objekti koji imaju istu fraktalnu dimenziju posjeduju iste zajedničke osobine nezavisne od njihove detaljnije forme. Fraktalna simetria i fraktalna dimenzija su karakteristične za rastuće strukture.

Prostorne forme koje pokazuju strukturnu i vizualnu korelaciju s fraktalnim geometrijskim formama, mogu se naći u prirodi na svim područjima, od mikroskopskih do makroskopskih veličina - od formacija galaksija, pejzaža Mjeseca, strukture morske obale, rijeka, planina i oblaka, pukotina i rascjepa u tvrdim materijalima, grubih površina, dima, fluidnih tokova, amorfnih tvari kao npr. staklo ili keramika, pa do živog svijeta biljaka, drveća, korijenja, cvijeća, lišća, kao i dijelova sistema živih bića kao npr. krvnih sudova, bubrega, pluća, nervnih ćelija.



Slika 85.

Prirodne forme koje pokazuju fraktalne karakteristike: samosličnosti: fraktalnu dimenziju i vizualnu kompleksnost.

Izmorfnost fraktalnih struktura i mnogih prirodnih formi, kao posljedica istovrsnih principa strukturiranja koji se temelje na repetitivnim procesima, omogućava računarsko algoritamsko kreiranje formi koje mogu biti vizualno i strukturno slične prirodnim oblicima. Korelacija prirodnih i pravilnih determiniranih fraktalnih geometrijskih formi nije doslovna, pa se za modeliranje prirodnih formi koriste algoritmi u koje je uključen faktor slučajnosti i stohastičke samosličnosti, kojim se oslikava odstupanje od stroge pravilnosti karakteristično za prirodne forme. Stohastičke fraktalne strukture predstavljaju područje kojim se od strogo determiniranih formi geometrija približava haotičnim i neuređenim stanjima, manifestirajući zakone koji nadilaze kruto zadane limite i prelaze u područje izuzetno bogate varijabilnosti.



Slika 86.
Prirodni pejzaž u računarskoj
grafici modeliran i
vizualiziran putem
algoritama baziranih na
fraktalnoj geometriji.
softver Terragen⁹³

⁹³ <https://planetside.co.uk>

4.3.5. L - sistemi

Informacijsko-matematički modeli bazirani na formalnoj gramatici omogućavaju reprezentaciju i simulaciju kompleksnih sistema i njihove dinamike. Jedan od takvih modela je i Lindenmayer sistem ili skr. L-sistem, simbolički formalni sistem kome je dodana računarski generirana geometrijska interpretacija. Biolog A. Lindenmayer ove sisteme formalne gramatike koristi kao osnovu aksiomatske teorije biološkog razvoja.⁹⁴ L-sistemi mogu modelirati mnogo kompleksnije geometrijske strukture od klasičnih, pa su u računarskoj grafici prikladni i za grafičku reprezentaciju fraktalnih geometrijskih struktura.

Preko određenih šifriranih procedura (Turtle graphics), zadani su osnovni postupci kojima se realizira računarski producirana geometrijska slika. Osnovni element je linijski segment, nastao kao trag kretanja, zadan jednostavnim šifriranim kodom:

F – kreći se naprijed (crtajući linijski segment) za određen korak (dužinu).

Ovaj linijski segment se određenim instrukcijama može transformisati u složeniju formu, multipliciranjem elemenata, odnosno mijenjanjem smjera kretanja za određen ugao, pomoću šifriranih oznaka, npr. :

- + rotirati segment za određeni ugao lijevo (obrnuto od smjera kazaljke na satu),
 - rotirati segment za određeni ugao desno,
- [] crtati prvo ono što je u zagradi, a zatim nastaviti postupak.

⁹⁴ Przemyslaw, Prusinkiewicz. Aristid, Lindenmayer. *The Algorithmic Beauty of Plants*. New York, Springer. 1990.

Forma geometrije L-sistema se zadaje preko aksioma i jednog ili više produkcijskih pravila, koja se zatim više puta ponavljaju za svaku fazu paralelno na svim nivoima.

Aksiom F _____

Pravilo $F \rightarrow F+F-F+F$

2. Iteracija F+F--F+F+F+F--F+F--F+F+F+F+F--F+F.



Slika 87.

Slikovni grafički prikaz procesa generiranja Kohove linije, na osnovu zadatog algoritma, kao L-sistema preko "turtle graphics" postupka.

Bilo da se radi o jednom linijskom segmentu ili složenijoj geometrijskoj linearnej formi, ona predstavlja inicijator kompleksne forme, koja nastaje kao limitirajuća kriva (atraktor) primjenjenog pravila produciranja, koje sadrži različite postupke geometrijske transformacije (ovi postupci mogu da sadrže više faza od kojih svaka predstavlja određen tip transformacije, koje uključuju rotaciju, uvećanje, umanjenje, uz multipliciranje određenog broja segmenata). Pravilo produciranja primjenjuje se kroz više transformacijskih nivoa, kao razvojnih faza određene forme.

L-sistemi kroz granajuće strukture, rekurzivnom zamjenom segmenata, mogu modelirati rast i morfologiju različitih bioloških organizama. Pretežno biljne forme istražene su u radovima A. Lindenmayera, a ostali jednostavni organizmi u radovima R. Dawkinsa.⁹⁵ Ukažujući na informacijsku osnovu mnogih bioloških morfoloških procesa baziranih na kompleksnim geometrijskim principima samosličnosti i evolutivnim transformacijskim procesima, principi modeliranja bioloških formi zasnivaju se na rekurzivnim, ponavljajućim principima definiranja složenih objekata uzastopnom zamjenom dijelova jednostavnog početnog objekta pomoću skupa ponavljajućih pravila.⁹⁶



Slika 88.

Forme strukturalno analogne biljnim oblicima generirane algoritamskim postupcima preko L-sistema.

Osnovna granajuća forma:

$$X=F[-X][+X], \\ \text{ugao } 30^{\circ}$$

Biljne forme:

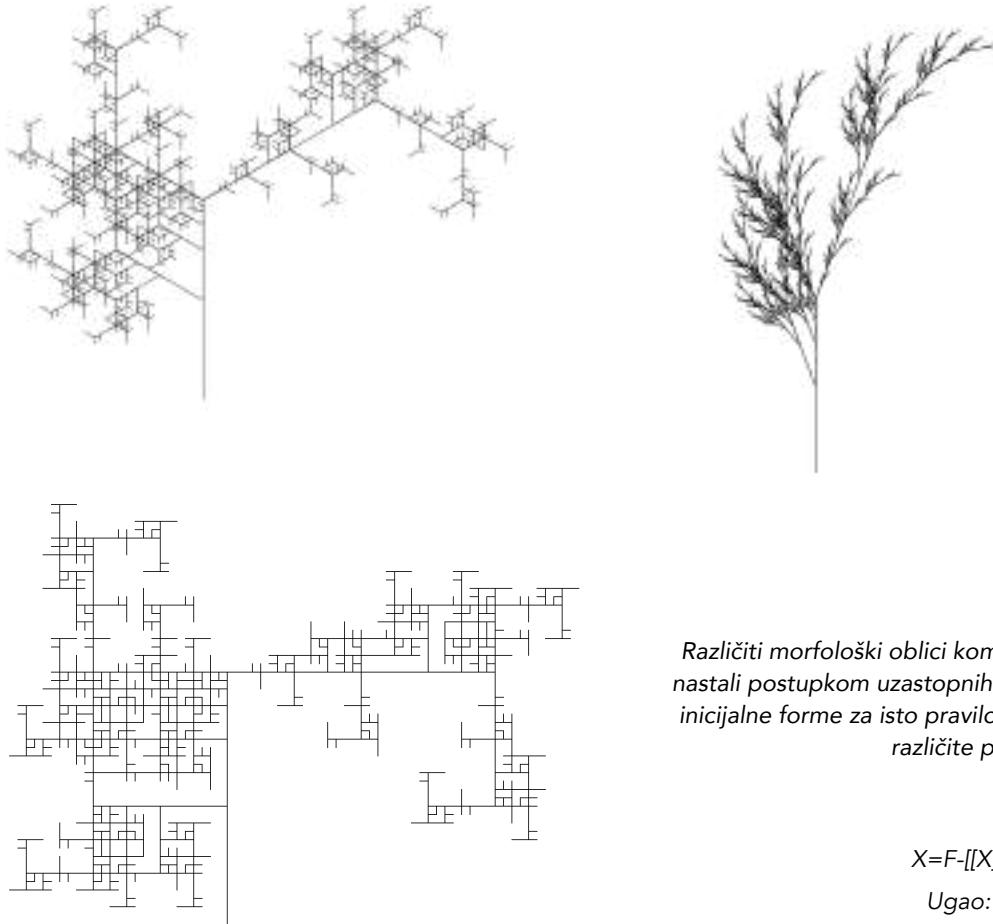
$$F=FF, \\ X=F[+X][-X]FX, \\ \text{ugao } 30^{\circ};$$

$$F=FF, \\ X=F-[[X]+X]+F[+FX]-X, \\ F=FF-[-F+F+F]+[+F-F-F], \\ \text{ugao } 22,5^{\circ}$$

⁹⁵ Richard, Dawkins. *The Blind Watchmaker*. W.W. Norton & Co. New York, 1996.

⁹⁶ Przemyslaw, Prusinkiewicz. Aristid, Lindenmayer. *The Algorithmic Beauty of Plants*. 1990. p. 1

Treba napomenuti da se preko L-sistema mogu reprezentirati zatvorene i otvorene, jednostavnije i kompleksnije geometrijske forme. Stepen kompleksnosti i morfologija rezultirajuće forme ovisi i o parametrima uglova za isto algoritamsko pravilo generiranja.



Slika 89.

Različiti morfološki oblici kompleksnih formi nastali postupkom uzastopnih transformacija inicijalne forme za isto pravilo produciranja i različite parametre ugla.

Aksiom: X
 $F=FF$,
 $X=F-[X]+X]+F[+FX]-X$,
Ugao: 60° ; $22,5^{\circ}$; 90°

4.3.6. Kompjutacijsko modeliranje dinamičkih procesa i celularni automati

Informatička teorija i kompjutacijska simbolička reprezentacija informacijskih procesa uključuje njihovu nematerijalnu determinaciju kroz apstrahovane kodirane strukture. Procesi prenošenja informacija kroz njihovu transformaciju, postaju univerzalni kroz alternativne modele kompjutacije, povezivanjem teorije dinamičkih sistema i kompjutacijske teorije.⁹⁷ Kompjutacijska paradigma svodi na univerzalne procese fizičku materiju i apstraktну mentalnu ideju, kroz zajedničke strukturne osnove informacijskih modela.

Teorija automata proizašla iz informacijskih i matematičkih nauka razrađena je u radovima John von Neumanna 50-tih godina 20. stoljeća. Von Neuman istražuje potencijale logičke i konstruktivne univerzalnosti jednostavnih kompjutacijskih modela baziranih na celularnoj strukturi uz samoreprodukciјu.⁹⁸ Istraživanjem mogućnosti definiranja univerzalnih kompjutacijskih modela preko osnovnih digitalnih mehanizama, nazvanih celularni automati, definirani su osnovi digitaliziranog pristupa proučavanju kompjutacijskih procesa koji obuhvataju mogućnosti reprezentacije mnogih dinamičkih procesa na jedan diskontinuiran, diskretiziran način.

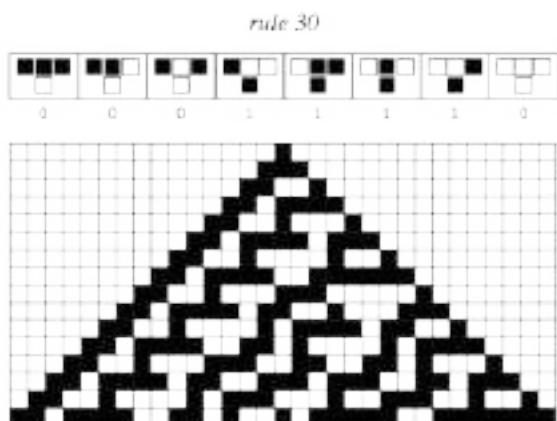
Celularni automati su formalni sistemi digitalnih objekata kao apstraktnih mrežnih čelijskih jedinica, čija su stanja determinirana grupom pravila kroz više razvojnih generacija i ovisna o okolini kroz razmjenu informacija.

⁹⁷ Stephen, Wolfram. *A New Kind of Science*. Wolfram Media, Champaign. 2002. p. 5.

⁹⁸ John, von Neumann. *Theory of Self-Reproducing Automata*. Ed. Arthur W. Burks. Urbana, University of Illinois Press, 1966.

Stephen Wolfram izvodi pretpostavku o univerzalnosti u ponašanju različitih dinamičkih sistema istražujući kvalitativna ponašanja elementarnih kompjutacijskih procesa, na osnovu proučavanja i analize dinamičkih uzoraka celularnih automata. Wolfram definira celularne automate kao "matematički model kompleksnih prirodnih sistema, koji sadrže veliki broj jednostavnih identičnih komponenti koje su u lokalnoj interakciji"⁹⁹

Celularni automati su diskretni dinamički čelijski sistemi koji se razvijaju u prostoru u diskretnim vremenskim koracima. Pozicije čelija su definirane unutar mreže prema zadanim lokalnim pravilima, tako da ovise o prethodnoj poziciji i poziciji susjednih čelija. Sve pozicije svih čelija u mreži u svakom dinamičkom koraku su sinhronizirane. Prostorno-vremenska dinamika sistema čelijskih stanja je diskretna.¹⁰⁰



Slika 90.

Grafički prikaz dinamičkih uzoraka celularnih automata.

Jednostavna zadana pravila koja regulišu dinamičku sukcesiju pozicija ćelija u mreži, daju kompleksne uzorke stanja.

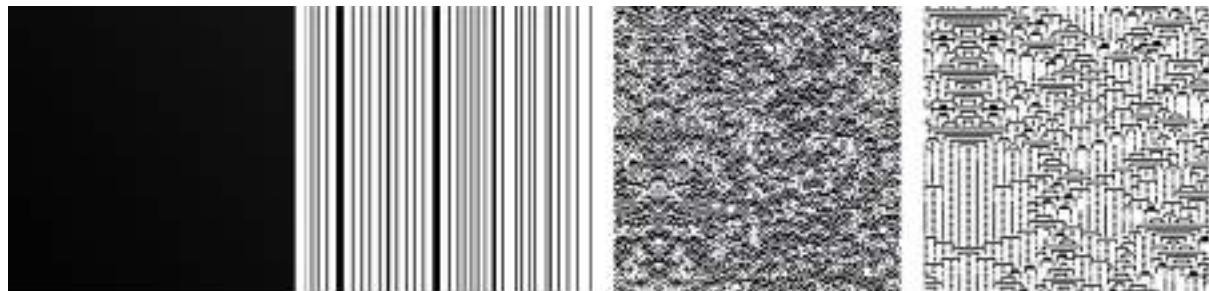
⁹⁹ S. Wolfram, Universality and Complexity in Cellular Automata. *Physica D*. 10, 1984. pp. 1–35.

¹⁰⁰ Diskretnost je diskontinuirana vrijednost u limitiranim vrijednostima pozicija.

Suma ponašanja svih ćelija uvezanih u paralelni sistem, predstavlja kompleksniji sistem od ponašanja pojedinačne ćelije, dajući u globalnoj slici dinamičkog ponašanja kompleksne uzorke. Uzorci ponašanja u globalnoj slici ovise o inicijalnim uslovima i pravilu koje regulira ponašanja lokalnih jedinica.

Proučavajući uzorke ponašanja elementarnih kompjutacijskih procesa, putem celularnih automata i njihove grafičke reprezentacije, Wolfram klasificira četiri osnovna tipa dinamičkih procesa.¹⁰¹

1. Homogeno uređeni procesi,
2. Ciklično ili periodično uređeni procesi,
3. Neuređeni – haotični procesi,
4. Kompleksni procesi.



Slika 91.

Grafički prikaz četiri vrste dinamičkih procesa modeliranih pomoću celularnih automata: homogeni, ciklični, haotični i kompleksni dinamički procesi.

¹⁰¹ Stephen, Wolfram. *A New Kind of Science*. 2002. pp. 231-241.

Homogeno i ciklično uređeni dinamički procesi obuhvataju procese čija je rezultanta statično, stabilno, predvidivo stanje. Svaka nova informacija u ovakvim sistemima biva uništena ili brzo asimilirana u ograničenom području, bez utjecaja na stabilnost sistema.

Haotični procesi iako nepredvidivi u smislu lokalnog ponašanja elementarnih jedinica, pokazuju predvidivu, globalnu ujednačenu neuređenost.

Kod kompleksnih procesa moguće je, mijenjanjem inicijalnih uslova, dovesti sistem u bilo koji od četiri moguća tipa ponašanja. Kompleksni dinamički procesi karakterizirani su lokaliziranim područjima uređenog i neuređenog stanja, pa se kompleksnost može smatrati rubnim područjem između haosa i reda.

Kompleksni procesi su po Wolframu karakterizirani mogućnostima univerzalne kompjutacije, što znači da su svi kompleksni sistemi međusobno kompjutacijski ekvivalentni.¹⁰² Kod bilo kog kompleksnog univerzalnog sistema, njegova svojstva su neovisna o detaljima njegove konstrukcije, a svi sistemi posjeduju isti nivo kompjutacijske sofisticiranosti.

Klasifikacija i modeli dobiveni preko jednostavnih kompjutacijskih sistema, mogu se tretirati univerzalnim za sve dinamičke procese, implicirajući ekvivalenciju u principima organizacije mnogih kompleksnih prirodnih, fizičkih, ali i perceptivnih i mentalnih procesa ljudskog mozga. Univerzalnost kompleksnih dinamičkih procesa daje mogućnost reprezentiranja kompleksnih prirodnih i artificijelnih sistema putem odgovarajućih simulacijskih kompjutacijskih modela. Područja umjetne inteligencije i umjetnog života kao dio kompjutacijskih nauka oslanjaju se na teoriju kompleksnih sistema i njene modele.

¹⁰² Ibid. pp. 674-675.

4.3.7. Modeli bazirani na "agentima" i inteligencija jata

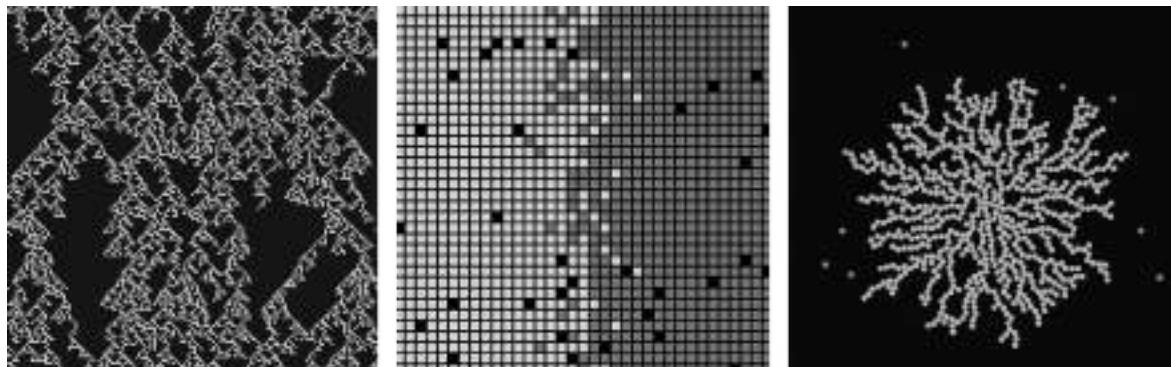
Modeli bazirani na "agentima" (engl. agent based modeli, skr. ABM) i "multi-agent" sistemi (MAS), vezani su uz informacijske modele koji omogućavaju simulaciju procesa interaktivne i kompleksne dinamike autonomnih entiteta - agenata, povezanih u dinamičkoj mreži odnosa. Ovi entiteti mogu i sami biti sistemi, različitog stepena kompleksnosti, ali njihova struktura nije relevantna, već njihove eksterne relacije kojima su one uvezane u jedinstven sistem. Predmet proučavanja je razvojna dinamika ovakvih sistema, pa se kroz kompjutacijsku simulaciju pokušava dobiti visoko apstraktna slika njihovih budućih stanja, uslovljenih zadanim procesnom dinamikom i različitim ulaznim parametrima.

Jedinke-agenci su povezane na lokalnom nivou, ali njihova interakcija rezultira kompleksnim stanjem cijelokupnog sistema. Ponašanje jedne jedinke može biti uslovljeno jednostavnom lokalnom procesnom dinamikom, ali cijelokupan sistem se ponaša kompleksno. Ovi agenti su nezavisni i interaktivni. Njihova ponašanja su uslovljena jednostavnim parametrima, ali se u međusobnoj povezanosti stvara emergentna struktura čiji obrasci ponašanja se ne mogu izvesti iz obrazaca ponašanja jedinke.

Modeli bazirani na autonomnim agentima, za razliku od celularnih automata, mogu biti definirani raznolikim mrežama povezivanja elemenata ili različitim nivoima interakcija, pa možemo reći da predstavljaju jedan proširen model u odnosu na celularne automate.

Razlikuju se single-agent i multi-agent sistemi, kod prvih su uglavnom unaprijed programirane reakcije na promjene u okolini.

Sredina u kojoj se razvija dinamika kompleksnih dinamičkih modela baziranih na agentima, može bitio faktor koji utječe na dinamiku i interakciju agenata. Kod multi-agent sistema radi se o intelligentnim sistemima zasnovanim na kompleksnijim modelima ponašanja koje nije unaprijed zadano, već je zasnovano na različitim modelima učenja i adaptacije na dinamiku okoline. Ovakvi modeli uključuju sinhronizirano ponašanje sistema agenata u kooperaciji i međusobnoj komunikaciji, sa mogućnostima samoreprezentacije i reprezentacije informacija iz okoline.



Slika 92.

Dinamički informacijski modeli bazirani na ponašanju apstraktnih autonomnih "agenata".

Prikaz grafičke vizualizacije dinamike kompleksnih procesa: stohastički celularni automati, celularni prikaz difuzne i agregatne dinamike fizičkih i apstraktних sistema, NetLogo.¹⁰³

¹⁰³ U. Wilensky. NetLogo. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL. 1999.

Multi-agent sistemi su osnova kreiranja sistema vještačke inteligencije koji postaju sve više inkorporirani u različite informacijski regulirane sisteme. Multi-agent modeli ne obuhvataju samo sinhronne simultane procese, već i asinhronne interakcije. Interakcije nisu lokalizirane samo na neposrednu okolinu, već mogu biti u određenom stepenu i globalnog dometa. Modeliranje bazirano na agentima razvija se još kroz radove Von Neumana i njegova istraživanja ponašanja kompleksnih adaptivnih sistema preko kompjutacijskih simulacija i celularnih automata.¹⁰⁴ Šira primjena i dostupnost simulacijskih modela različitih kompleksnih sistema, podržana je razvojem softverskog programa koji podržava simulaciju različitih kompleksnih dinamičkih sistema omogućavajući njihovo proučavanje koje nadilazi analitički ili linearan pristup.¹⁰⁵

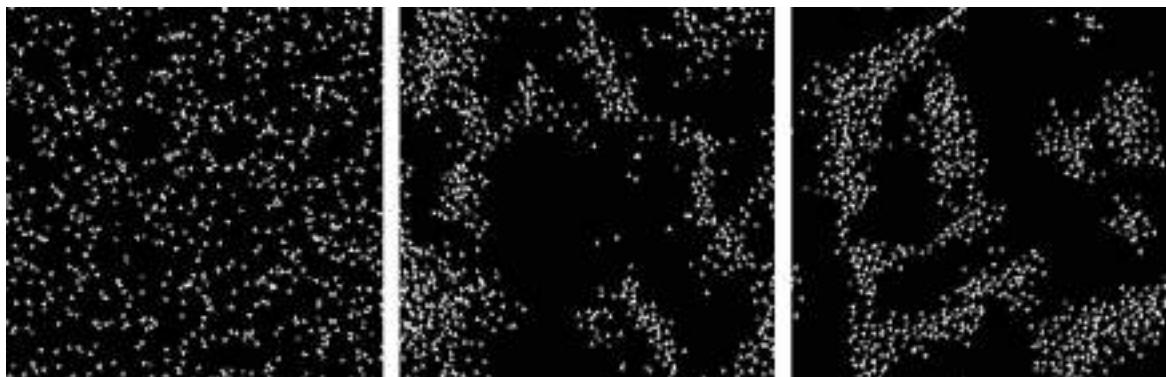
Inteligencija jata (engl. *swarm-inteligencija*) je pojam nastao iz proučavanja nekih prirodnih sistema gdje se iz ponašanja grupe velikog broja jedinki (mravi, insekti, ptice....), koji slijede jednostavna pravila ponašanja, formiraju emergentni sistemi koji djeluju kao kompleksne samoregulirajuće strukture. Ovaj termin koristi se u kompjutacijskim simulacijama ponašanja kompleksnih decentraliziranih sistema sastavljenih iz mnoštva jedinki. Ove jedinke slijede jednostavna pravila, djelujući na osnovu lokalnih informacija, ali grupna cjelina djeluje kao jedinstven sistem koji funkcioniра ne jednom višem nivou. Svojstvo sistema "swarm inteligencije" je sposobnost koordiniranog djelovanja bez posebne centralne kontrole. Elementi sistema ponašaju se stohastički¹⁰⁶, njihovo ponašanje uslovljeno je lokalnim dinamičkim vezama s okolinom.

¹⁰⁴ John, von Neumann. *Theory of Self-Reproducing Automata*. 1966.

¹⁰⁵ Star Logo i Net Logo, su neke od najpoznatijih interaktivnih softverskih platformi koje omogućavaju simulaciju kompleksnih dinamičkih sistema; <https://education.mit.edu/project/starlogo-tng/> ; <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/>

¹⁰⁶ Stohastički procesi su slučajni procesi koje se odvijaju po zakonima vjerovatnoće kao matematičke apstrakcije.

Iz pojedinačnih obrazaca ponašanja izrasta kolektivna dinamika složenijeg karaktera, koja se ne može objasniti iz jednostavnih lokalnih dinamičkih uzroka. Iz jednostavnih lokalnih interakcija jedinki koje sačinjavaju sistem, reagovanjem na dinamičke efekte u neposrednoj okolini, nastaju kompleksni kolektivni dinamički obrasci. Vanjski i unutarnji poremećaji regulišu se korekcijama i rekombinacijama elemenata sistema, čija decentralizirana povezanost omogućava lokaliziranje mogućih destabilizirajućih efekata.



Slika 93.

Kompleksni sistemi nastali koordiniranim sinhroniziranim djelovanjem većeg broja jedinki koje slijede jednostavna pravila.

Simulacija dinamike jata, Net Logo, Flocking.¹⁰⁷

Jednostavni principi držanja odstojanja uz usklađivanje i usmjeravanje ka prosječnom smjeru i položaju lokalnih jedinki, rezultiraju globalnim ponašanjem jata.

¹⁰⁷ U. Wilensky. NetLogo Flocking model. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/Flocking>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL. 1998.

“Swarm” inteligencija je povezana uz oblast vještačke inteligencije (AI), koja se razvija proučavajući funkciranje samoorganizirajućih sistema koji posjeduju svojstva stabilnosti i samoodrživosti uprkos mogućim poremećajima i nestabilnosti u dijelovima sistema, u novim okolnostima i izmjenama u okruženju. Inteligencija jata označava funkciranje samoorganizirajućih emergentnih sistema koji posjeduju sposobnost učenja i prilagođavanja promjenama u okolini.

4.3.8. Informacijska determinacija evolutivne forme i genetički algoritmi

U svijetu u kome je fabricirana okolina postala toliko kompleksna da je postala nepredvidiva i neodrživa uslijed tehničkih limita linearog mehaničkog planiranja, nauka i tehnika se sve više okreću ka organskim pojavama, da bi razumjeli i savladali procese koji prožimaju kompleksnije sisteme. Iz dvadesetog stoljeća, koje je pripadalo fizikalnoj materijalističko - tehnološkoj civilizaciji, ulazimo u dvadeset prvo, koje će pripadati neo-biološkoj, informatičko - tehnološkoj civilizaciji.¹⁰⁸

U savremenoj digitalnoj eri, kompjutacijska paradigma koja sve više prožima sfere nauke, umjetnosti i kulture, ocrtava se i u novim pristupima proučavanju organskih pojava u prirodi. Na današnjem nivou razvoja nauke o živim sistemima, dešava se određen pomak u smjeru povećanog interesa za informacijsko-programatske procese koji karakteriziraju žive organske sisteme, bez obzira na materijalnu sadržinu biološke supstance.

¹⁰⁸ Kevin, Kelly. *Out of Control: The New Biology of Machines, Social Systems, and the Economic World*. 1994. pp. 6-8.

Biotehnologija sa nanotehnologom, artificijelni život (A-life) i artificijelna inteligencija (AI), područja su nauke praćena otvaranjem novih pristupa ka kreiranju bioničke konvergencije tehnološke i organske forme. Tehnologija kompjutabilne reprezentacije, uz pomoć evolucijske teorije, molekularne biologije i teorije kompleksnih sistema, proučava funkcionalne prirodne procese na principima kompjutacijske ekvivalencije i sintetizacije organskih procesa u alternativnom mediju.

U istraživačkim programima u okviru nauke o artificijelnom životu (A-life), život kao procesna forma, a forma kao informacijski sadržaj, ne materijalno-fizički, postaje najvažnija esencija života. Bazirana na postavci da se logičke forme dinamičke organizacije organskog života mogu apstrahovati iz materijalne baze i reprezentirati kao dinamičke strukture koje posjeduju ista svojstva, kompjutacijska verzija naučnog proučavanja, sinteze i simulacije životnih procesa u artificijelnom mediju, uspostavlja jedinstven morfološki univerzum determiniran univerzalnim zakonima bio-logičke forme.

Rekonstrukcija formi analognih živom organizmu, ne podrazumijeva poznavanje samo fizičkih aspekata konkretnih prirodnih modela, već reinterpretaciju njihove kompleksne strukture uz pomoć apstraktne reprezentacije dinamičkih morfološko-funkcionalnih formi organizacije. Von Neumann definira kompjutacijske modele koji mogu reprezentirati i procese samoreprodukциje i mutacije, uz pomoć matematsko-kompjutacijskog modela koji je baziran na kompleksnoj nelinearnoj determinaciji.¹⁰⁹

Logička i konstruktivna univerzalnost kompleksnih procesa omogućava interpretaciju univerzalnih dinamičkih zakona ustrojstva organskih sistema, neovisno o materijalnom biološko-hemijskom supstratu.

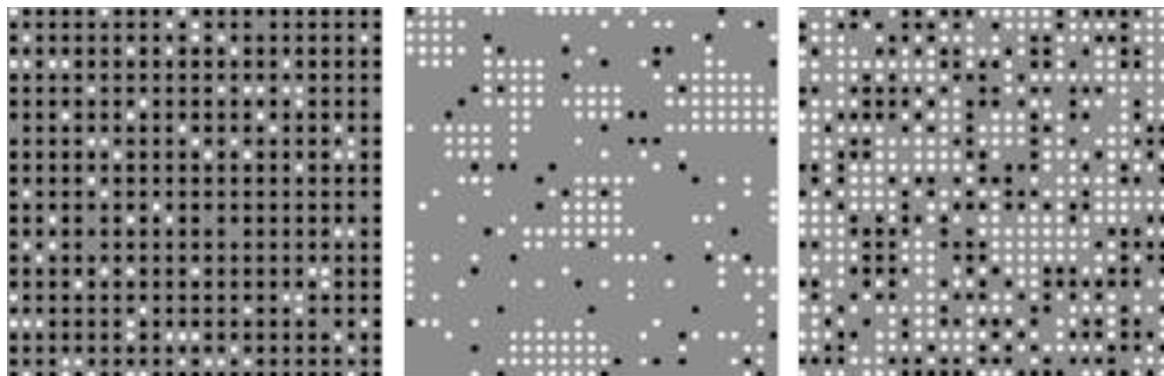
¹⁰⁹ John, von Neumann. *Theory of Self-Reproducing Automata*. 1966.

Proučavanja organskih sistema uključuju različite aspekte funkciranja i generiranja formi koje se manifestiraju kao živi organizmi, obuhvatajući i interne samorazvojne i eksterne evolucijske procese, kao faktore koji utječu na generativnu konstrukciju organizma. U ovisnosti o tome koji aspekti su ključni predmet interesa, primjenjuju se različiti reprezentacijski i simulacijski modeli bazirani na zajedničkim principima svojstava kompleksnih sistema, koristeći diskretizirano vrijeme, prostor i njihove parametre, pomoću različitih klasa formalnih apstrakcija fizičkih sistema.

Za reprezentiranje nekih internih samorazvojnih morfoloških karakteristika organskih formi prikladni su grafički kompjutacijski modeli bazirani na fraktalnoj geometriji i L-sistemima, a pomoću "celularnih automata" i sistema baziranih na "agentima", moguće je modelirati strukturalnu dinamiku prirodnih organskih fenomena kao što su biološka samoreprodukcija, intercelularna komunikacija, evolutivna morfogeneza i sl.

Fragmentacija i višeslojna modulacija su neophodni preduslovi ustrojstva paralelnih distribuiranih organskih sistema. Iz lokalne procesne interakcije jednostavnih elemenata ili njihovih složenijih modula, moguće je producirati veoma kompleksne nelinearne generalne forme, čija morfologija i funkcionalna dinamika nisu programirane unaprijed, već su produkt emergentnog svojstva samoorganizacije kompleksnih sistema.

Proučavanje principa kompleksne organske organizacije, dovelo je do otkrića da se kompleksni prirodni fenomeni ne mogu uspješno rekonstruisati na istom stepenu složenosti ili „odozgo na dole“, već obrnutim putem, proučavajući jednostavnije nivoje njihove višeslojne strukture, moguća je reinterpretacija ovih procesa „odozdo na gore“, paralelnim uvezivanjem elementarnih jedinica jednostavnog programatskog ustrojstva.



Slika 94.

Grafički prikaz dinamičkih samorazvojnih i evolucijskih procesa modeliranih pomoću apstraktnih informacijskih modela.

Simulacija dinamike biološke homeostaze ekoloških sistema, Net Logo, Daisyworld.¹¹⁰

Jednostavni principi i lokalna ponašanja uslovljena faktorima okoline, daju kompleksne generalne dinamičke uzorke.

Determinacija kompleksnih dinamičkih sistema nije moguća na klasičan linearne mehanički način (pojednostavljenom predvidivom funkcijom), jer uključuje višeslojne dinamičke procese. Računarska tehnologija omogućava simulaciju ovakvih procesa pomoću apstraktnih informacijskih modela, uključujući ekvivalentne strukturne relacije i procese, kroz višestruke prostorno-vremenske nivoje, u vidu dinamičke, diahronijske slike, animirane procesnom dinamikom.

¹¹⁰ M. Novak. U. Wilensky. NetLogo Daisyworld model. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/Daisyworld>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL. 2006.

Potencijal adaptabilnih kompleksnih sistema ocrtava se kroz njihov razvoj i evoluciju ka višim nivoima kompleksnosti. U evolutivni razvoj kompleksnih organskih sistema uključeni su različiti procesi kao što su auto-geneza i replikacija sistema, koji su limitirani uslovima održanja predeterminirane forme, te stoga imaju i svoje granične domene, uz procese koji omogućavaju fleksibilne varijacije u cilju prilagodbe i održanja sistema u odnosu na promjene u okolini.

Evolucija je regulisana održivom kreativnošću organizma, koji kroz dinamičke procese komunikacije sa okolinom, simbioze, unutarnje permutacije, samoorganizacije i modifikacije, bira svoje buduće optimalno stanje. Fizička manifestacija organske forme, njena morfologija i ponašanje, mogu se opisati i determinirati kao rezultanta cjelokupnih evolutivnih organskih procesa. Evolucija ne teče samo gradualno već i kroz fazne tranzicije - skokove.

Richard Dawkins uz pomoć informacijskih modela koji simuliraju evolutivni razvoj morfoloških vrsta, dolazi do zaključaka o nastanku kompleksnih prirodnih formi. On naglašava da kompleksni oblici rijetko nastaju kao rezultat slučajnosti, koja se često vezuje uz Darwinovu teoriju evolucije. Iako su slučajne mutacije jedan od bitnih faktora nastanka novih vrsta i novih svojstava, jedna značajnija mutacija koja bi naglo promijenila svojstva nekog organizma, nije adekvatan oblik procesa koji bi opisao evoluciju. Nastanak novih vrsta kao kompleksnijih organizama po Dawkinsu je rezultat gradualne, kumulativne transformacije, korak po korak iz jednostavnijih oblika.¹¹¹

¹¹¹ Richard, Dawkins. *The Blind Watchmaker*. 1996. pp. 14, 43- 45.

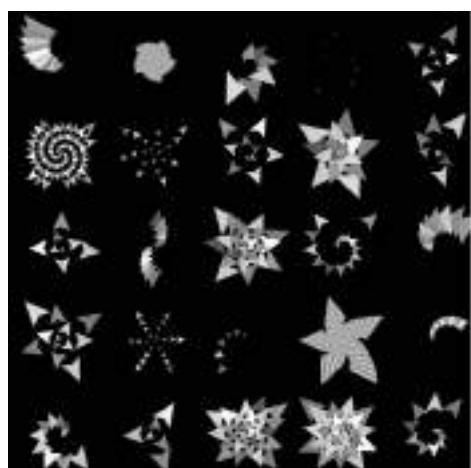
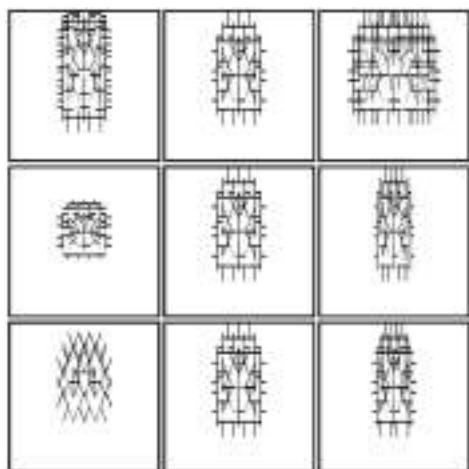
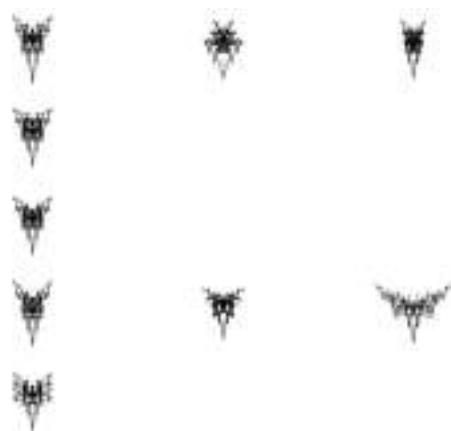
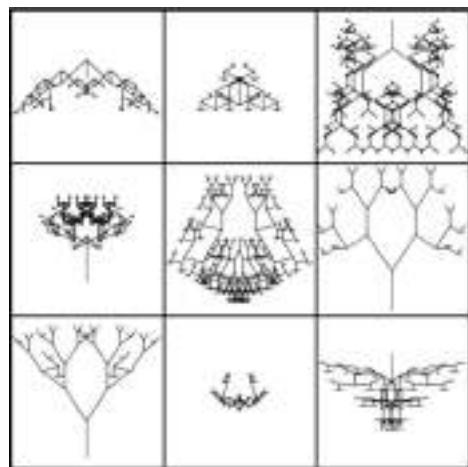
Dawkins koristi matematičke informacijske modele koji simuliraju evolutivne genetičke procese¹¹², preko algoritama koji omogućavaju reprodukciju i mutacije, istražujući genetički prostor koji je višedimenzionalan. (Sl. 95.) lako su morfološke razlike između susjednih pozicija u prostoru minimalne, genetički prostor sadrži veliko bogatstvo formi koje se bitno razlikuju u udaljenim regionima, tvoreći nove evolutivne vrste i oblike. Slučajnost igra veću ulogu u kratkim koracima kroz manje mutacije, dok kumulativna sukcesija daje bitno različite forme koje su prošle evolutivnu selekciju baziranu na prethodnim osnovama.¹¹³

Genetički algoritmi i evolucijski dizajn u računarskoj simulaciji predstavljaju složene procese, bazirani na Darwinovoj teoriji evolucije prirodnih živih organizama i teoriji kompleksnih adaptabilnih dinamičkih sistema. Osnovne prepostavke unutar ovih procesa su naslijede, mutacija i rekombinacija elemenata, čiji su genetički moduli dati kao logičke jedinice apstraktnog informacijskog koda.

Genetički algoritmi omogućavaju selekciju između određenih jedinki po nekom određenom kriteriju, te ukrštanje i mutaciju kojom se producira naredna generacija jedinki. Proces razvoja u genetički programiranom softverskom sistemu se može odvijati po unaprijed programiranim kriterijima (algoritmima) selekcije, tako da korisnik ne mora učestvovati kroz više razvojnih faza svojim utjecajem, ali isto tako može svojim izborom uticati na slijedeću fazu.

¹¹² Dawkins koristi softverski program baziran na genetičkim algoritmima, nazvan Biomorph, kojim vizualizira forme nastale mutacijama i međusobnim rekombinacijama jednostavnih geometrijskih oblika, iz kojih kroz niz koraka proizilaze forme izuzetne kompleksnosti, strukturalno slične biološkim formama.

¹¹³ Richard, Dawkins. *The Blind Watchmaker*. 1996. pp. 14, 43- 45, 50-56, 169.



Slika 95.

Reprezentacija transformabilnih varijacija i mutacija forme određenog genotipa u faznom genetičkom prostoru, pomoću genetičkih algoritama.

Osnovna svojstva organskih sistema koja je potrebno reproducirati u vidu formalnog prostorno-vremenskog strukturalnog uzorka su:

- Samoreprodukcijska,
- Međuvisnost dijelova,
- Pohranjivanja, modifikacije i razmjena informacijskog sadržaja,
- Funkcionalna interakcija sa okolinom,
- Stabilnost i adaptacija na promjene u okolini,
- Sposobnost otvorenog evolutivnog razvoja.

Geometrijski sistem koji na određen način modelira evolutivne forme ne opisuje potpuno razvijene forme (konačne i završene), već služi kao set ograničavajućih uslova koji djeluju kao princip samoorganizacije tokom morfogeneze.

Genotip kao interni logički ustrojen gradivni prototip mogućeg u apstraktном mediju, može evoluirati u veći broj različitih eksternih fenotipa unutar morfološkog prostora. Pošto u evolutivnom procesu ne postoji samo jedno zadovoljavajuće rješenje ili konačni zadani oblik, govori se o faznom prostoru, koji je definiran više značnim stanjima i formama.

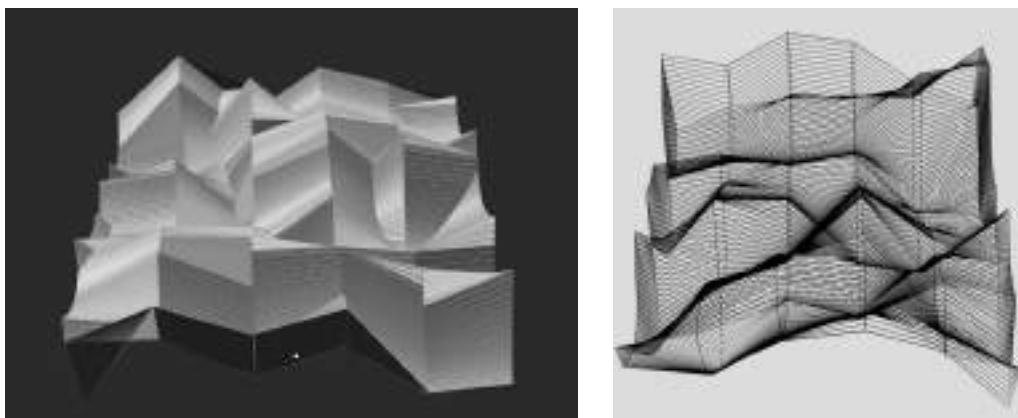
Značaj kolektivnog karaktera evolucije, potencira evoluciju kao informacijski proces u kome se informacija prenosi u naredne generacije, kao izvor kompleksnosti života.

4.4. KOMPLEKSNI SINTETIČKI GEOMETRIJSKI I INFORMACIJSKI PROSTORNI MODELI

Kompleksni geometrijski modeli u geometriju uvode hijerarhijske nivoe ili oblasti, limite, relativne mjere, kompleksnu i nelinearnu dinamiku. Geometriju ne možemo isključiti iz otkrića savremenih prirodnih ili informacijskih nauka, od mikrofizike do celularnih kompjutacijskih prostora, iako se klasična euklidska geometrija vezuje uz zakonitosti makro svijeta - svijeta u kome čovječe mjerilo određuje stepene veličina. Vezujući geometriju uz fizikalne, biološke i psihološke strukture s jedne strane i apstraktne informacijske s druge, dobivamo mnogo kompleksniji sistem, sintetizirajući kvantitativne i kvalitativne odlike prostora, objedinjujući apstraktna i konkretna dinamička svojstva.

Sintetički kompleksni dinamički prostor kontinuiranog polja različitih djelovanja, izgrađen je kako na pojmovnim konstrukcijama, tako i na čulnim strukturacijama informacija, u korelaciji moći poimanja i predstavljanja, prostor sinteze materijalnog i idealnog, konkretnog i univerzalnog. Ovakav prostor nije homogen i beskonačan, a kontinuitet je ostvaren na jednom kompleksnom hijerarhijskom nivou. Njegova ekstenzija nije linear nog karaktera, već se može govoriti o graduiranom prostoru, koji na određenim nivoima kompleksnosti ima prirodne granice, sa diferenciranim područjima ili podoblastima.

U sintetičkom prostornom modelu, vrijeme nije komplementarni pojmovi vid stvarnosti, već je sintetizirano u prostorno-vremenskoj dimenziji, u vidu niza prostornih nivoa određene kontinuirane konfiguracije, kao slojevitost razvojne dinamike.



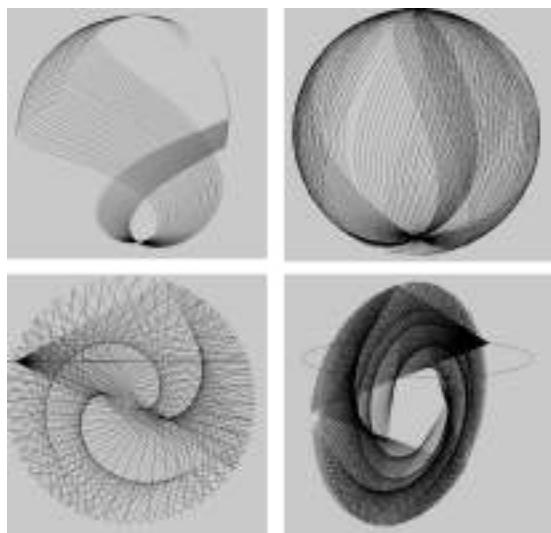
Slika 96.

Prostorna geometrijska forma kao slojevita konfiguracija sintetizirane prostorno-vremenske dimenzije.

U klasičnom geometrijskom prostoru zanemarena je niveliраност простора, limitiranost обlastи или зона, корелациона повезаност поједињих нивоа (области и подобласти) простора, периодична и аперодиична динамика, развојна и еволутивна динамика, дисконтинуалност или скокови између поједињих структурних нивоа, те на крају и динамика репродукције, што су све одлике које карактеризирају реални, физикални и природни простор. Савремена наука захтјева укључење ових просторних квалитета у један комплекснији модел геометрије који би био погоднији за примјену на свим подручјима који се дотичу просторних реалитета и њихових квалитета (а не само квантитета).

Kompleksni dinamički koncepti omogućavaju novi pristup procesu prostornog modeliranja, u kome je moguće definirati prostorne forme kao hijerarhijske sisteme procesnog karaktera, dajući im dinamičke odrednice koje nadilaze svaku klasičnu prostornu predstavu, objedinjujući različite nivoe složenosti u jedinstven kompleksni dinamički razvojni sistem. Kompleksni prostorni koncepti obuhvataju sve vrste transformacija, u koje osim transformacija podudarnosti spadaju i transformacije sličnosti i samo-sličnosti.

Geometrijske strukture u kompleksnim dinamičkim prostornim konceptima definirane su kao ishodi transformacija i kao takve posjeduju dinamički karakter, koji predstavlja svojstvo otvorenosti i interaktivnosti prostornih struktura. Transformacije imaju multiplicirajući karakter, što znači da jedna forma prolazi kroz različite oblikovne faze, odnosno stepene formiranja.



Slika 97.

Dinamička prostorna geometrijska forma kao rezultanta multipliciranih transformacija.

4.4.1. Multidimenzionalan dinamički geometrijski prostor

Kompleksni dinamički geometrijski koncepti definiraju prostor koji je višeslojan i multidimenzionalan. Prostorne forme nastale kao rezultat višestruko djelujućih procesa imaju "granajući" odnosno višestruki karakter. U kompleksnom dinamičkom prostoru ne postoji jedno objektivno stajalište promatranja, kao jedan određeni smjer ili tačka. Jedan smjer ili tačka promatranja daju nepotpunu i nedovoljnu predstavu bilo koje kompleksne prostorne strukture. U kompleksnom geometrijskom prostoru svaki smjer ili tačka imaju jednaku vrijednost, nijedan nije posebno istaknut ili naglašen. Isto tako nijedan nije cjelovit ili potpun, pa je potrebno više različitih prikaza, pa i modela, radi dobivanja cjelovite predstave. Različiti prikazi predstavljaju različite strukturne nivoje složenosti neke forme, kao dinamički otvorene razvijajuće forme.

Dinamika unutar kompleksnog geometrijskog prostora je nelinearnog karaktera, predstavljajući višeslojni razvoj neke prostorne strukture, te stoga možemo reći da je kompleksni prostorni koncept multidimenzionalan. U klasičnom euklidskom geometrijskom modelu ova se multidimenzionalnost može prezentirati u vidu razlomljene ili međudimenzije.

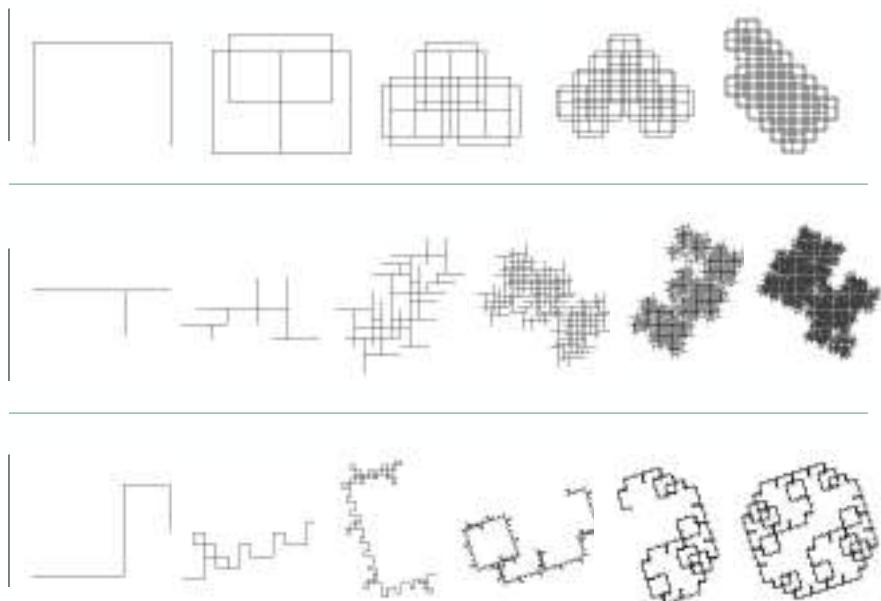
Geometrijsko znanje je razvijano i dopunjavano otkrivanjem sve složenijih transformacija. Fraktalna geometrija otvorila je područje transformacija umnožavanja i rasta kao samosličnosti, istovjetno sa pitanjem vizualne predstave i karakterom određenih referentnih sistema date predstave.

Kompleksni geometrijski koncepti kao simetričnu uređenost prostornih struktura podrazumijevaju i simetriju kroz različite skale veličina, što se označava pojmom samosličnosti. Pravila uređenosti neke strukture prenose se kroz različite nivoe složenosti, što rezultira vizualno komplikiranom sličnošću.

Simetrija samosličnosti kao rezultat auto-referencijalnosti geometrijskih struktura, predstavlja izvor pravilnosti kompleksnih sistema, kao princip uređenosti koji se prenosi kroz različite nivoe i smjerove, kroz različite skale veličina ili različite dimenzije. Stohastička ili statistička sličnost mnogo je češći oblik kompleksne simetrije u realnim sistemima, pa i ovaj vid uređene organizacije postaje bitna odrednica kompleksnih dinamičkih formi.

Kompleksne geometrijske strukture su modularno generirane. Određen geometrijski modul nije jednoznačno određen ili univerzalan kao u klasičnoj geometriji. Bilo kakva geometrijska struktura može biti definirana kao modularna jedinica ili generator neke kompleksne geometrijske forme. Inicijalno stanje neke kompleksne geometrijske forme predstavlja imaginarnu jedinicu (koja odgovara pojmu tačke u klasičnoj geometriji) i isto tako može biti definirana različitim geometrijskim strukturama, različitog stepena složenosti. Multiplicirajući karakter generativnog procesa transformacije inicijalne forme rezultira multipliciranom skalom veličina (sa aspekta klasične geometrije). Možemo reći da je generirajući modul skalirajućeg karaktera.

Jedno određeno inicijalno stanje rezultira mnoštvom različitih faznih stanja, ovisno o veoma malim promjenama generirajuće strukture. Svaka minimalna promjena u bilo kojoj fazi, daje veoma različite strukturne varijante u narednim fazama. Kao rezultat ove osjetljivosti na male promjene različitih parametara, pojavljuje se varijabilnost i multivarijantnost dajući izuzetno bogatstvo diferenciranih oblika.



Slika 98.

Diskontinuirana slika kompleksne geometrijske strukture kroz niveliранe faze razvoja.

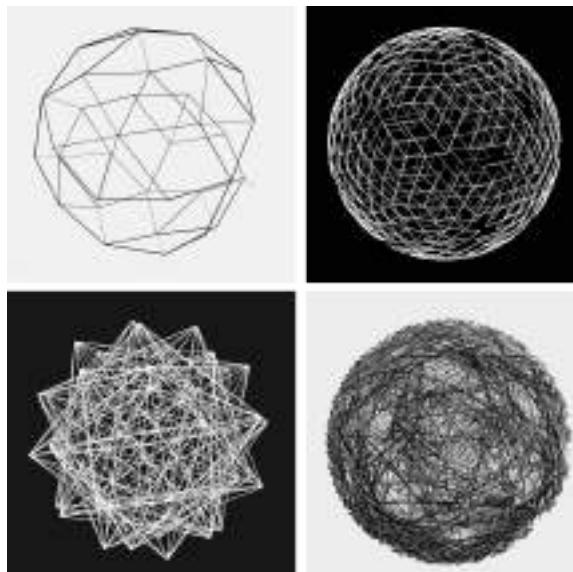
Prikaz različitih nivoa razvoja forme kao L-sistema zadanoj iteracijom određenog algoritma.

Uvođenjem više različitih nivoa prikaza jedne kompleksne geometrijske strukture, pojavljuje se diskontinuirana slika na jednom određenom referentnom nivou. Pojavljivanje diskontinuiteta otvara pitanje kontinuirane predstave prostora.

Kontinuirane geometrijske strukture predstavljane na određenom referentnom nivou imaju linearni karakter kao izraz jedinstva i predvidivosti nekog sistema. Linearnost je moguća i ostvariva u okviru određenog nivoa složenosti, a sve transformacije unutar limita ovog nivoa su kontinuirane i uključuju samo elemente toga nivoa.

Svaka transformacija koja uključuje neke elemente izvan limita, ili neke elemente isključuje, predstavlja diskontinuiranu transformaciju u odnosu na jedan referentni nivo. Rezultat ovakvih transformacija su strukture nepredvidive u granicama određenog nivoa, te su stoga nelinearnog karaktera. Kontinuirane, linearne strukture su karakteristika sistema ograničenih na jednom jednostavnom nivou složenosti, zatvorenih sistema.

Geometrijske forme kompleksnih geometrijskih koncepcija su transformabilne, promjenjivog oblika, koji predstavlja samo određeni nivo razvojne dinamike. U ovakovom konceptu ne postoje početne ili završne forme (kao savršene ili završene), već je svaka forma ishodište prethodnih transformacija i polazište naslijednih transformacija. Ove transformacije posljedica su interaktivnosti prostornih struktura, odnosno otvorenosti i nedovršenosti svake zasebne cjeline, koja stupajući u interakcije postaje podstrukturom neke veće, složenije cjeline.



*Slika 99.
Geometrijske forme u kompleksnom
geometrijskom modelu baziranom na
kontinuiranim transformacijama.*

Postavlja se pitanje reprezentacije i vizualizacije geometrijskog koncepta koji bi bio prikladan za predstavu prostora kao kompleksnog prostorno-vremenskog kontinuma, u skladu sa savremenim naučnim pogledima na prostor. Klasična geometrija zasnovana je na kontinuitetu i homogenosti prostora, kao jedinstvenim karakteristikama. U skladu sa mogućnostima poimanja i predstavljanja, u sklopu struktura perceptivno-logičkog karaktera, euklidski model je omogućavao vizualnu predstavu geometrijskih struktura, primjenjivu u praktičnoj konstrukciji i realizaciji prostornih sistema. Proširenjem Euklidskog geometrijskog prostornog modela uključivanjem npr. fraktalnih struktura, u geometrijskom prostoru oslikava se kompleksna prostorno-vremenska dinamika, kao razvojna promjena formi i oblika. Uključujući transformacije složenijeg tipa koje mogu izlaziti iz okvira referentne ravni vizualnog prikaza, može se uočiti vizualna diskontinuiranost ovakvih transformacija.

Problem prostornog predstavljanja i modeliranja dinamičkih sistema koji nadilaze klasične principe, u grafičkom smislu postaje problem prikaza kontinuiranosti višestrukih transformacija ili složenih faza ovih transformacija u vidu diahronijske slike. Svaki niži informacijski nivo predstavljanja zahtijeva nadoknadu izgubljenih informacija, koja je moguća preko višestrukih sinhronijskih transformacija, od kojih svaka daje određenu limitiranu predstavu. Sintetizacija ovih predstava odvija se na nivou intuitivnih misaonih procesa i moguća je upravo zahvaljujući kompleksnom dinamičkom karakteru prostornog poimanja.

Olovka i trougao, osnovna pomagala praktične geometrije, postaju neadekvatni alati za grafičku interpretaciju kompleksnih dinamičkih geometrijskih modela. Novi informacijski determinirani algoritamski modeli i novi mediji digitalizirane informacijske tehnologije omogućavaju ne samo neutralnu, statičnu prostornu reprezentaciju već i interaktivnu simulaciju dinamičkih procesa koji uključuju višeslojne faze vremenskog razvoja.

4.4.2. Struktura prostora digitalne geometrije

Digitalna slika, kao vizualna manifestacija računarske grafike, reprezentacijom digitalnog signala putem binarnih brojeva, vizualnu informaciju svodi na konačan set digitalnih vrijednosti. Grafički interpretiran digitaliziran prostor dat je u vidu rasterske mreže uniformnih tačaka ili područja - celija. Broj tačaka je ograničen, a između njih se ne mogu interpolirati međuveličine. Preciznost je striktno definirana, kao i stepen tačnosti prikaza informacijskih podataka.

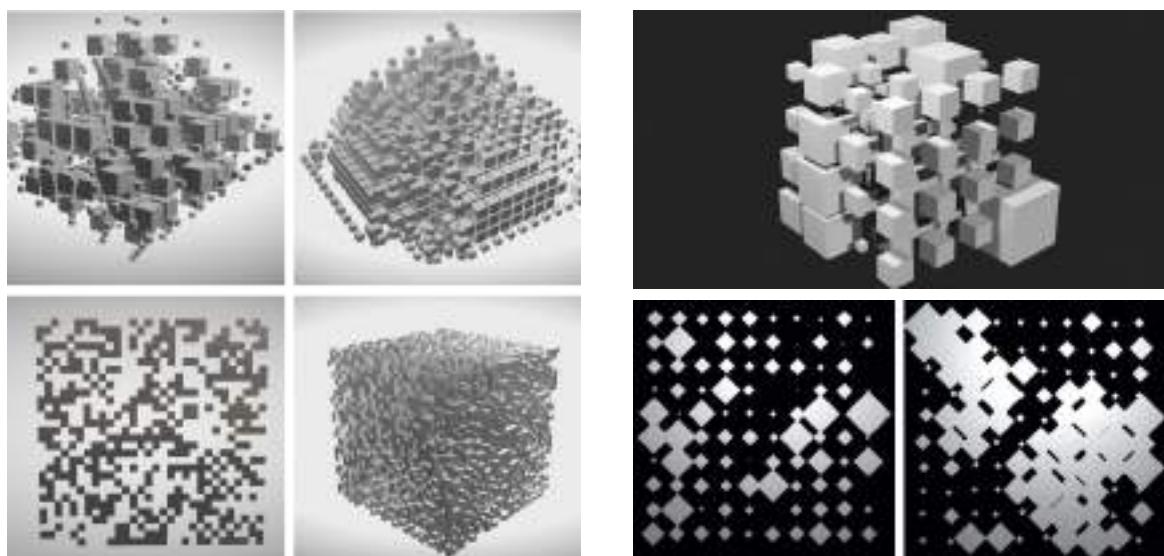
Rasterska - celularna digitalna reprezentacija putem određenog broja odvojenih položaja daje nelinearan, diskontinuiran i aproksimativan prikaz procesa koji predstavljaju bazu informacijske poruke, koji mogu biti linearнog ali isto tako i nelinearnog karaktera. Stoga mogućnosti digitalne grafičke reprezentacije nadilaze mogućnosti klasične linearne grafičke reprezentacije (bazirane na matematskim funkcijama i klasičnoj geometriji). Digitalnom grafikom mogu se reprezentirati nelinearni procesi koji su do njenog razvoja bili vizualno nepredstavlјivi, kao što su mnogi kompleksni prirodni formativni procesi.

Digitalna geometrija kao posebna oblast vezana uz računarsku grafiku i analizu digitalne slike, razvija se tek u drugoj polovici 20. stoljeća. Prostor ove geometrije predstavlja digitalni model euklidskog 2D ili 3D prostora. Potrebno je naglasiti razliku između vektorskog grafičkog modela, koji je baziran na identičnim karakteristikama prostora kao i klasična euklidska geometrija, što podrazumijeva neograničen i kontinuiran karakter prostora i digitalnog rasterskog modela koji je baziran na drugačijim karakteristikama.

Prostor digitalne geometrije je ograničen, sveden na konačan broj diskretnih (odvojenih, posebnih) elemenata, a osnovne prostorne tvorevine nemaju kontinuiran karakter, već predstavljaju skup pojedinačnih osnovnih elemenata; „pixela“ u 2d prostoru, odnosno „voxela“ u 3D prostoru. Elementi slike – pixeli, osnovne nedjeljive jedinice, pohranjene u vidu rasterske projekcije, mogu reprezentirati i najkompleksnije procese, kao što su samo-razvojno reproduktivni prostorni procesi. Najelementarniji kompjuterski model ovakvih evolutivnih procesa bazira se na principu celularnih automata, pomoću kojih se proučavaju procesi ekvivalentni procesima razvoja života i inteligencije, što im daje veoma značajnu ulogu u novim naučnim područjima koje se bave pitanjima kreiranja vještačkog života (A-life) i vještačke inteligencije (AI). Digitalnom grafičkom reprezentacijom mogu se reprezentirati kompleksni nelinearni procesi kao i grafički prikaz samo-razvojno reproduktivnih procesa.

Prostor digitalne geometrije ima drugačiju strukturu od klasičnog euklidskog geometrijskog prostora. Osnovni elementi – ćelije prostora, polarizirani su u vidu aktivnih i neaktivnih ćelija, kao njihovi binarni „naponi“, koji determiniraju i njihove gradivne forme. Digitaliziran prostor je ograničen, diskontinuiran, nelinearan, a forme su u njemu determinirane karakterom i brojem konekcija osnovnih elemenata. Vizualna struktura mikro-područja i makro-područja prostora mogu biti kvalitativno uslovljena skalom veličina njihove reprezentacije. Različite skale veličina mogu reprezentirati različite prostorne karakteristike formi. Razvijenu kompleksniju formu se najčešće ne može determinirati „odozgo na dole“. Veoma jednostavno strukturalno ustrojstvo forme (algoritamsko pravilo programskog procesa), može rezultirati vizualnom formom koju nije moguće determinirati ni jednim klasičnim vidom strukturalne reprezentacije.

Iako se u računarskog grafici vezanoj za praktičnu tehničku primjenu potencira vektorski pristup determiniranju prostornih geometrijskih formi radi preciznijeg prevođenja u linijsku grafiku, reprezentacija nelinearnih, kompleksnih sistema uvodi digitaliziranu celularnu formu, ne samo kao metodu definiranja kompresije slike, već kao generativni potencijal jedne kvalitativno drugačije geometrije.



*Slika 100.
Celularna reprezentacija digitalizirane geometrijske forme.*

Nelinearan, diskontinuiran prikaz vizualne informacije sveden je na konačan broj diskretnih (odvojenih, posebnih) elemenata.

4.4.3. Otvoreni sintetički dinamički geometrijski modeli

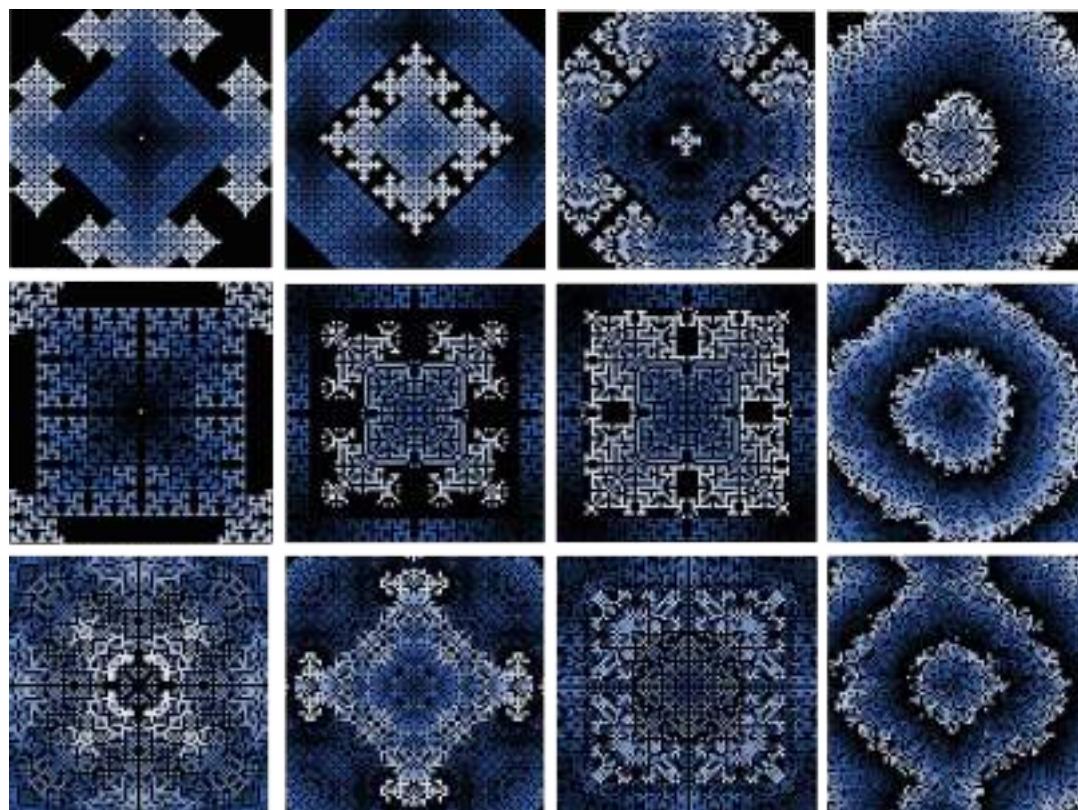
Uočavanje postojanosti u sklopu promjena jedna je od temeljnih postavki geometrije, koja se odražava u obliku kontinuiteta geometrijskih strukturnih konfiguracija izloženih transformacijama. Kompleksni dinamički geometrijski konceptualni model kontinuirane transformacije strukturnih prostornih konfiguracija ne polazi od nekih predeterminiranih elementarnih struktura ili osnovnih elemenata. Utemeljen je na nivelliranim strukturnim transformacijama osnovnih (bazičnih) konfiguracija, koje ne možemo svesti na mali broj tipskih elemenata, već je njihova struktura praktički veoma varijabilna i diferencirana. Ovaj se model može povezati uz klasičan geometrijski - euklidski model i njegove mogućnosti grafičke reprezentacije, s tim što je potrebno sistematizirati i dopuniti sisteme transformacija u dinamičkoj sukcesiji.

U jednom kompleksnom geometrijskom konceptualnom prostornom modelu moguće je da osnovni prostorni element bude bilo koja geometrijska forma, koja se onda sistemom transformacija prevodi u forme višeg reda. Ove transformacije su hijerarhijski povezane i mogu imati kontinuiran ili diskontinuiran karakter. U kompleksnom dinamičkom geometrijskom konceptualnom prostoru moguće je povezati različite prostorne strukturne stepene složenosti (različite dimenzije), na takav način da se npr. jednodimenzionalna linija transformacijama može "prevesti" u dvodimenzionalnu formu - površ, ili obrnuto. Ne postoji ni oštra granica između zatvorenih i otvorenih formi, jer se zatvorena forma može transformacijama dovesti do otvorene forme koja nema konačni oblik ili jasne geometrijski definirane limite.

Beskonačnost i konačnost postaju dio istog modela, koji je i racionalan i iracionalan, apstraktan i konkretan, u kome su red i haos izvori mogućnosti ne samo varijabilnih transformacija već i kvalitativnih novina u prostoru beskonačnih potencijala. Model prostora kao kompleksnog dinamičkog razvojnog sistema, koji uključuje višeslojnu predstavu ove kompleksnosti, realiziran u vizualno-grafičkom obliku, uz pomoć računarskih alata i informacijskih prostornih modela, omogućava primjenu kompleksnijih dinamičkih prostornih koncepcija u inženjerskim i kreativnim djelatnostima koje se bave prostornim problemima, u kojima arhitektura zauzima istaknuto mjesto.

Problem reprezentacije kao enkodiranja relevantnih aspekata svijeta, odnosno njegove apstrakcije, s jedne strane obuhvata kodirane simboličke strukture i pravila njihove manipulacije, a s druge njihov interfejs i interakcije s kognitivnim kapacitetima ljudskoguma u cilju donošenja odluka na osnovu modelirane situacije. Hiperarhija geometrijskih modela i njihovih dimenzija kroz dinamičan odnos u neprekidnom sistemu projektivnih transformacija, s jedne strane omogućava jasniju vidljivost odabranih aspekata i odnosa u diferenciranim dimenzijama, a s druge strane, ambivalentnost čitanja uslijed kompresije informacija u različitim dimenzijama, otvara složen odnos opisa i interpretacije.

Geometrijski modeli kao otvoreni modeli, omogućavaju dodavanje različitih semantičkih interpretacija, uzimajući u obzir širok raspon fizičkih, ekonomskih ili društvenih procesa i parametara, stvarajući uslove za pojavu apstraktnog razumijevanja prostornih i informacijskih konfiguracija i odnosa kroz različite interpretacije. Geometrijski prostor postaje zajednički komunikacijski prostor dijaloga postojećeg i mogućeg, materijalnog i idealnog, apstraktnog i konkretnog.



Slika 101.
*Dinamički prostor transformacijskog potencijala kompleksne otvorene forme.
Proceduralni celularni model razvoja kompleksnih urbanih struktura.*
NetLogo¹¹⁴

¹¹⁴ U. Wilensky, NetLogo Urban Suite - Cells model. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/UrbanSuite-Cells>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL. 2007.

5

GEOMETRIJSKI PROSTORNI KONCEPTI U ARHITEKTURI

Potreba za uspostavljanjem svijeta stabilnih prostornih objekata i opisivanjem njihovih svojstava i odnosa, koja dovodi do razvoja geometrije, vezuje se uz praktične probleme svakodnevne prakse, od kojih su primarnu ulogu imale djelatnosti kao što su graditeljstvo i zemljomjerstvo. Geometrija u arhitekturi ima konstruktivnu, estetsku i simboličku formativnu ulogu. Determinirajući s jedne strane strukturne karakteristike i vizualni izraz oblika arhitektonskog objekta kao prostorne forme, a s druge strane sintaksu jezika arhitektonskog projekta i njegove reprezentacije, geometrija objedinjujući konstruktivne i konceptualne aspekte organizacije prostora, generira složene prostorne forme.

U klasičnoj arhitekturi geometrija služi kao sistemska podloga za utvrđivanje stabilnosti, reda i mjere arhitektonske forme, usklađujući oblik, konstrukciju i funkciju, dijelove i strukturu, u jedinstvenu cjelinu. Cjelovitost arhitektonske forme znači uređenost dijelova u koherentan sistem, gdje svaki dio doprinosi strukturalnoj stabilnosti i funkcionalnom jedinstvu cjeline.

Geometrija primijenjena u arhitekturi se najčešće posmatra sa tri aspekta: metrički, reprezentacijski i oblikovno-formalistički. Metrički aspekti geometrije su uglavnom vezani za standardizaciju mjere i kvantifikaciju geometrijskih parametara u vidu prostornih dimenzija. Reprezentacijski aspekti geometrije fokusirani su na metode prostornog grafičkog prikaza, dok su formalistički aspekti geometrije usmjereni ka definiranju prostornih volumena i površina u okviru geometrijskog oblikovnog tipološkog i kombinatoričkog potencijala.

Geometrijski koncepti su otvoreni za različite interpretacije u različitim dimenzijama, omogućavajući strukturiranje informacija i naknadno dodavanje semantičkih slojeva u kojim forma dobiva kontekstualno značenje. Geometrijski modeli podupiru različite aspekte evaluacije prostornih relacija i odnosa, kako metričkih i oblikovnih, tako estetskih i funkcionalnih.



Slika 102.

Prostorne forme u arhitekturi bazirane su na različitim geometrijskim konceptima i njihovim interpretacijama.

*Katedrala Notre-Dame
u Chartresu, 12/13. st.*

*Antoine Predock:
CLA Building,
California State Polytechnic
University, Pomona,
1993.*

Zevi definira esenciju arhitekture kao organizacije prostora u smislenu formu kroz proces limitiranja.¹¹⁵ Proces limitiranja je u suštini vezan za pojam mjere, koja predstavlja limite nekog reda. Pod pojmom reda nisu obuhvaćena samo jednostavna ponavljanja identičnih elemenata, već i ponavljanja razlika koje čine objedinjenim sistem elemenata povezanih ne svojom identičnošću, već sličnošću razlika.¹¹⁶

Pravilnost i red su način sistematskog povezivanja dijelova u cjelinu. Hijerarhijski organizirani sistemi reda uključuju pojam limita jednog nivoa reda, i mogu imati jedan ili više krajnijih limita ili biti bez krajnijih limita. Pojam konačnog i beskonačnog, početka i kraja, ograničenog i bezgraničnog, vezan je uz organizaciju limita nekog uređenog sistema. Princip reda ne mora se odnositi samo na statične prostorne odnose već i na dinamične i temporalne relacije, stvarajući hijerarhijske stepene reda, ka sve višim nivoima, ne obuhvatajući samo predvidive vrste reda. Predvidivost je samo specifična vrsta jednostavnog reda kod koga je na osnovu nekoliko koraka ili dijelova sistema determiniran cjelokupan sistem reda. Pojam reda obuhvata i mnogo kompleksnije, dinamičnije vrste reda kod kojih se ne može uspostaviti jednostavna determinacija elemenata i njihovih odnosa na osnovu jednog segmenta ili nekoliko dijelova sistema.¹¹⁷

Princip reda ili uređenosti jedan je od osnovnih principa na kojima se zasniva informacijsko modeliranje podataka koji tvore određene sklopove i cjeline s ciljem njihove reprezentacije, pohranjivanja, razmjene i interakcije. Principi reda uključuju ne samo opis aktualnog reda već i anticipaciju procesa zasnovanih na nadilaženju prethodnog reda.

¹¹⁵ Bruno, Zevi. *Architecture as Space: How to look at architecture*. 1993. p. 49.

¹¹⁶ David, Bohm. *Wholeness and the Implicate Order*. 1980. pp.146-147.

¹¹⁷ Ibid.

Pojmovi reda i mjere usko su vezani za pojam strukture, koja predstavlja sistem organizacije reda i mjere. Iako je pojam strukture najčešće shvaćen kao statična prostorna konfiguracija povezanih elemenata, njen izvor u latinskoj riječi "struere" je dinamičkog porijekla, označavajući procese gradnje, rasta i razvoja. Struktura je organiziran sistem koji izrasta iz reda i mjere, ne samo na jednom jednostavnom nivou, već obuhvata višeslojnu hijerarhijsku organizaciju višestruko niveliranih sistema reda i mjere, koji djeluju koherentno kao jedinstven dinamički sistem.¹¹⁸

Savremeni pogled na forme, strukture i procese kao jedinstvenu pojavu, formu tretira kao dinamičku strukturu koja dobiva svoj pojavnji oblik u određenom limitiranom kontekstu, ali se transformira u neki drugi oblik promjenom limita odnosno konteksta.



Slika 103.
Dinamičke prostorene strukture obuhvataju višestruke sisteme reda i mjere.
Gustav Eiffel: Ajfelov toranj, Pariz, 1887/89.

¹¹⁸ David, Bohm. *Wholeness and the Implicate Order*. 1980. pp. 151-152.

Apstraktni geometrijski sistemi kao osnova modeliranja i predstavljanja prostora, neminovno smanjuju određenu kompleksnost i složenost prostornih fenomena definiranjem određenih limita. Ni za jedan geometrijski sistem i model ne možemo reći da obuhvata sve aspekte prostora u potpunosti, pa je postojanje više različitih geometrijskih sistema i modela način cjelovitijeg pristupa proučavanju i modeliranju prostornih fenomena.

Razvoj geometrije dozvoljava sve ekstenzivnije grupe transformacija same forme, da bi na generalnijim nivoima geometrije razdvojene i različite forme postale jedinstvene. Tako se na primjer u afinoj geometriji kružnica i elipsa pretvaraju u jedinstvenu geometrijsku strukturu, u projektivnoj geometriji povezuju se svi konični presjeci u jednu generalnu cjelinu, a u topologiji kružnica, kvadrat i trougao dobivaju jednu jedinstvenu topološku formu.¹¹⁹

Geometrijski prostor može biti definiran na dva načina: lokalno, u obzir uzimajući samo neposredno susjedstvo i neposredno bliske elemente prostora, gdje koordinatni sistemi postaju lokalizirani, ili u odnosu na eksterni modularni strukturni okvir, koji može biti definiran kao metrička jedinica ili metrički koordinatni sistem.

Kroz različite koncepte kao što su paralelnost, projektivitet, sličnost i samosličnost, transformacija, simetrija i topološka izomorfost, nastaju različiti geometrijski sistemi. Euklidska, projektivna i nacrtna geometrija, analitička i diferencijalna geometrija, neeuklidska geometrija i topologija, fraktalna geometrija i digitalna geometrija, definirane su različitim konceptualnim okvirima. Karakter osnovnih geometrijskih elemenata, relacija i zakonitosti mijenja se u odnosu na geometrijski sistem u kome su definirani i interpretirani.

¹¹⁹ Manuel, Da Landa. *Intensive Science and Virtual Philosophy*. Continuum, London, New York, 2002. p. 26.

Različiti geometrijski modeli bili su osnovom arhitektonskih kompozicionih i strukturalnih prostornih odnosa, pa je na primjer u klasičnoj arhitekturi prostor bio definiran ne kao beskonačna homogena ekstenzija, već kao konglomerat izoliranih, odvojenih formi, koje su bile povezane određenim relacionim svojstvima jednakosti, sličnosti i proporcije. Sistem mjerjenja je u klasičnoj antičkoj arhitekturi bio zasnovan na unutarnjim relacijskim odnosima dijelova objekata, a ne na nekom vanjskom univerzalnom generalnom sistemu.

Pojam prostora u današnjem smislu kao geometrijski determinirane i kontinuirane, trodimenzionalne, homogene i izotropne ekstenzije, u starijim civilizacijama nije bio poznat, već je npr. u klasičnoj Grčkoj kulturi bio razdijeljen u pojmove mjesta i praznine ("topos" i "kenon"), uz pojam "khora" koji označava teritorij, takođe vezan uz pojam prostora.¹²⁰

Prostor kao mjesto ili praznina, kao teritorij ili neutralna pozadina, provlači se kroz arhitektonsku teoriju, najčešće povezujući svojstva praznine i neutralnosti uz apstraktne, geometrijske aspekte prostora. Kartezijanski absolutni geometrijski prostor preuzima dominantnu ulogu nad svim čulnim objektima, da bi Kant prostor oslobođio iz empirijske sfere kao transcendentalnu strukturu u domenu svijesti. Matematičke teorije prostora koje se šire kroz neeuklidske, zakriviljene, višedimenzionalne i topološke prostore, preuzevši primat nad prostorom i vremenom, odvajaju pojam prostora od fizičke i socijalne realnosti u apstraktну sferu logičkog uma. Pitanje premošćenja procjepa između mentalnog i fizičkog prostora, po Lefevbru je jedan od fundamentalnih problema nastalih identifikacijom realnog prostora isključivo kao mentalnog i idealnog.¹²¹

¹²⁰ Roberto, Torretti. *Philosophy of Geometry from Riemann to Poincare*. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, 1978. pp. 25-26.

¹²¹ Henri, Lefebvre. *The Production of Space*. Blackwell, Oxford, 1991. pp. 2-3.

Iako se geometriji u arhitekturi često pripisuje direktni reprezentacijski karakter, Poincare naglašava da je "reprezentativni prostor samo slika geometrijskog prostora, deformirana nekom vrstom perspektive, u kojima možemo sebi reprezentirati objekte samo tako da poštuju zakone te perspektive."¹²²

Kartezijanski bestjelesni um je disperzijom tijela i forme u polje tačaka, prostor pretvorio u prostor potencija a ne samo prostor figura i tijela. U kontrastu sa idealnom geometrijskom formom, nametnutom pasivnoj, inertnoj materiji, novije teorije kojim se geometrija sintetizira sa realnim, materijalnim i živim svjetom, tretiraju geometrijsku formu kao kompleksnu dinamičku potenciju koja emergira iz prostornih relacija.

Savremeni naučni i filozofski pogledi na prostor i geometriju usmjeravaju se od stabilne forme ka dinamičkim procesima. Umjesto jednakosti pažnja se usmjerava ka razlikama i morfološkim varijacijama. Umjesto ka uniformnoj jedinstvenosti prostorne geometrijske apstrakcije vode ka bogatstvu mnogostrukosti i multipliciteta. Kompleksni dinamički geometrijski prostor postaje prostor mogućih stanja a ne stabilnih konačnih oblika.

Geometrijski prostor implementiran u arhitekturi je apstraktni konfiguracijski prostor koji limitira i strukturira područje mogućeg kombinatoričkog potencijala prostornih formi. Poput gramatike prostornog jezika, geometrija strukturira prostorne događaje i oblike. Po Hillieru arhitektura počinje tamo gdje konfiguracijski aspekti forme i prostora nisu tretirani kao nesvjesna naslijedena pravila, već su dignuta na nivo svjesne komparativne misli, postajući dio kreativne svijesti.¹²³

¹²² H. Poincare, *Science and Hypothesis*. 1905. p. 66.

¹²³ Bill, Hillier. *Space is the Machine: A configurational theory of architecture*. 2007. p. 32.

Svjesno, kreativno promišljanje oslanja se na apstrakciju i geometrijsku prostornu konceptualizaciju. Geometrijska apstrakcija posjeduje potencijal transformacije realnog svijeta dajući mu novu formu projektovanu kroz fizičke objekte. Arhitekt svjesno promišlja pravila, mijenja ih kroz transformaciju rješenja iz prošlosti ka novoj realnosti.



Slika 104.

Konfiguracijski aspekti savremene arhitektonske forme oslonjeni na apstrakciju i geometrijsku konceptualizaciju.

Rem Koolhaas/OMA: CCTV, Beijing, 2012/13.

Zaha Hadid: Generali Toranj, Milano, 2017.

5.1. KLASIČNI GEOMETRIJSKI PROSTORNI ELEMENTI, FORME I KONCEPTI U ARHITEKTURI

Arhitektonska forma proizilazi u začetku razvoja arhitektonskih prostornih koncepcija iz fizičke materijalne strukture s jedne strane i iz intuitivnih geometrijskih poimanja s druge, objedinjujući apstrakciju i konkretnu materijalnu situaciju. Potrebno je naglasiti da su u drevnim kulturama znanja geometrije povezivana s nadzemaljskim ili božanskim principom kreacije, a geometrijske figure i tijela dobivaju svojstva koja nadilaze zemaljska ograničenja i prolaznost, kao bezvremene i vječne forme.

Klasična arhitektonska forma geometrijski je definirana kao struktura i kao oblik. Razdvojenost strukture i oblika ili njihova jedinstvenost karakterizira određene epohe u razvoju arhitektonskog prostornog oblikovanja. Struktura je definirana jasnom distinkcijom i diferencijacijom elemenata i njihovih veza, dok je oblik jedinstven i u njemu dijelovi ustupaju mjesto jedinstvu cjeline. Postizanje jedinstvenosti oblika koji se često izjednačava sa formom, nije jednostavan postupak, jer su u arhitekturi strukturalna svojstva značajna fizička determinanta građenja.

Struktura i oblik u klasičnoj arhitektonskoj prostornoj konceptualizaciji odlikuju se statičnim karakterom, pa se arhitektonska forma pojavljuje kao manifestacija stabilnosti i otpora promjenama u okolini, kao postojan oblik i stabilna prostorna struktura.

Geometrijski prostorni sistem analogni je posrednik realizacije prostorne ideje, u kome se planiraju i ostvaruju prostorni elementi i forme u arhitekturi. U primijenjenom klasičnom geometrijskom modelu utvrđuju se karakteristike neke prostorne forme: njen položaj i lokacija, veličina i oblikovno-konstruktivne karakteristike. Geometrijski elementi i prostorne figure i tijela kao kompoziti elemenata: tačaka, linija, uglova, površina, grade hijerarhijske prostorne strukture koje se mogu posmatrati kroz različite nivoe. Geometrija omogućava razumijevanje prostorne kompozicije u arhitekturi, kroz prepoznavanje karakterističnih prostornih elemenata, svojstava i relacija.

Otvorene i zatvorene, kompaktne ili disperzne forme, načini povezivanja i podpodjele dijelova, odnosi veličina i odnos dijelova s cjelinom, kvalitativni su parametri kompozicije arhitektonske forme proizašli iz geometrijskih principa. Utemeljena na geometriji koja je generalnu strukturu dobila u Euklidovim "Elementima", geometrijska forma nije samo konglomerat geometrijskih elemenata: tačaka, linija i površina, već je određena i uslovljena svojstvima unutarnjih zakona geometrijskog sistema.

Klasičan pristup geometrijskom modeliranju arhitektonske forme rješava probleme objedinjenja strukturnih dijelova arhitektonskog objekta u složenu ali jedinstvenu cjelinu putem geometrijskih zakonitosti mjernih i proporcijskih sistema, kao i principa simetrije, koji postaju osnovne determinante prostorne kompozicije u klasičnoj arhitekturi.

5.1.1. Klasični mjerni i proporcijski geometrijski sistemi u arhitekturi

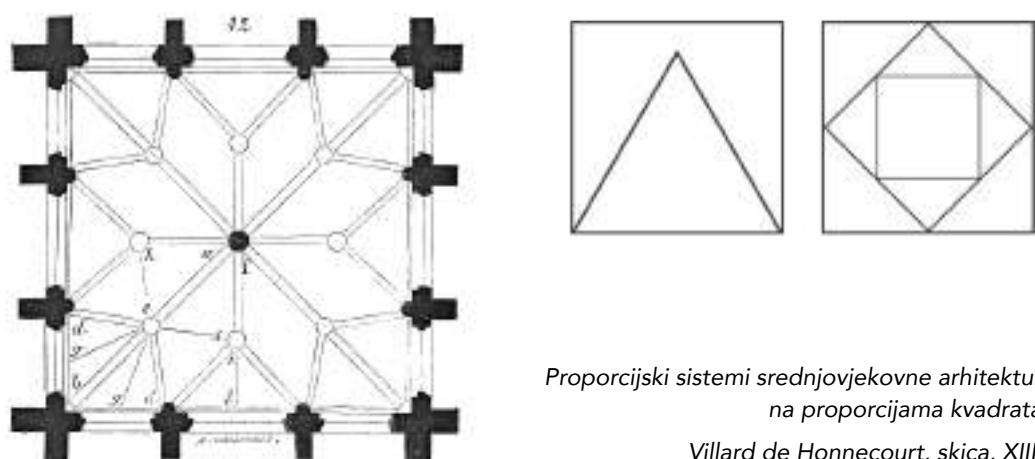
Rani razvoj geometrije baziran je na utvrđivanju stabilnih relacionih odnosa prostornih objekata. Relacije veličina, kao omjera jednog objekta prema drugom i omjera dijelova objekta jednog prema drugom, utvrđene su postupkom mjerena. Mjerenjem se upoređuju objekti i utvrđuju jednakosti, razlike i ponavljanja. Cilj mjerena je da se razlike definiraju na osnovu uočenih jednakosti, polazeći od intuitivno i empirijski utvrđenih elemenata i relacija. Dužina, površina, zapremina, intuitivni su relacioni pojmovi koji predstavljaju osnovu geometrijskog prostornog poimanja, a linija, površina i tijelo intuitivni su prostorni elementi koji definiraju ove relacije. Određenim relacionim odnosima definirane su i osnovne geometrijske figure: kvadrat i pravougaonik, trougao i kružnica, te njihovi elementi ugao i dijametar.

Od drevnih civilizacija Egipta i Mezopotamije, klasične Grčke i Rimske arhitekture, preko Gotičke, Renesansne pa do moderne arhitekture, različiti proporcijski sistemi bili su osnova prostornih odnosa u arhitektonskoj gradnji. Geometrijski sistemi mjere i proporcije u arhitekturi doprinose jedinstvenosti i cjelovitosti kompozicije različitih pojedinačnih dijelova.

Geometrijska proporcija predstavlja mjerni sistem koji određuje veličine i dimenzije jednog objekta, prožimajući njegovu strukturu kroz sve pojedinačne dijelove. Zakoni proporcije kao racionalni principi koji obezbjeđuju skladnost i harmoniju nekog arhitektonskog objekta, predstavljali su konstantu koja geometrijskim jedinstvom usklađuje i povezuje sve dijelove u jedinstvenu prostornu cjelinu.

Primjena geometrijskih zakona u arhitekturi, kao univerzalnog principa kompozicije dijelova i njihove harmonične hijerarhijske gradacije u sklopu neke prostorne cjeline, koja se može naći u svim periodima i stilovima, zasnovana je na pristupu kojim se tražila egzaktna i objedinjena osnova estetskih i strukturalnih aspekata. Uspostavljanjem korelacije mjera različitih dijelova objekta, dužine, širine i visine, kao i odnosa dijelova naspram cjeline, postizana je u klasičnoj arhitekturi, po Vitruviju, potpuna simetrija objekta kao euritmija.¹²⁴

Iako se pojam proporcije uglavnom vezuje uz matematički numerički izraz odnosa dva omjera, proporcija se u nekim pristupima vezuje uz odnose geometrijskih figura i njihovih karakteristika. Proporcijski sistemi povezani uz najjednostavnije geometrijske figure (kvadrat, trougao, kružnica) kao karakteristične metode proporcije arhitektonskih objekata, tzv. metode "ad quadratum" i "ad triangulum", primjenjivane su najčešće u gradnji srednjeg vijeka.



Slika 105.
Proporcijski sistemi srednjovjekovne arhitekture bazirani
na proporcijama kvadrata i trougla.
Villard de Honnecourt, skica, XIII st. (lijevo)

¹²⁴ P. M. Vitruvius. *De arhitektura libri decem - Deset knjiga o arhitekturi*. 1999. knjiga 1

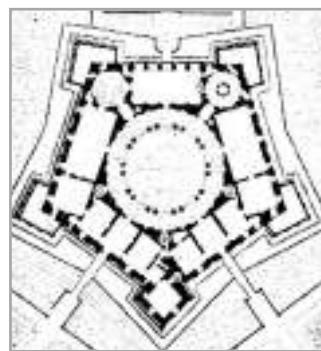
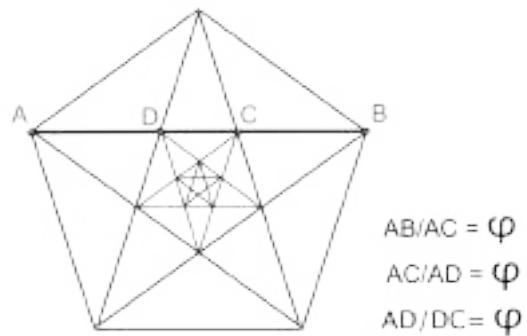
Korištenje muzičkih skala ili iracionalnih proporcijskih sistema kao što su odnos strane kvadrata i njegove dijagonale ili proporcija "zlatnog reza" u klasičnoj arhitekturi, govori o tome da racionalne brojčane proporcije nisu imale primat nad geometrijskim koje su obuhvatale i iracionalne odnose.¹²⁵ Odnos racionalnog i iracionalnog, konačnog i beskonačnog, u klasičnim arhitektonskim koncepcijama predstavlja odnos zemaljskog i božanskog, koji je u osnovi pokretač kreativnog procesa. Ovaj odnos može biti komplementaran ili u harmonijskoj sintezi, koja iz razlika izvlači jedinstvo kroz principe proporcije.

Iz odnosa racionalnog i iracionalnog, proizilaze različite karakteristike arhitektonske forme, od monumentalne arhitekture starog Egipta, preko antropomorfne forme klasične grčke arhitekture, komplementarnog odnosa iracionalnog i racionalnog u gotičkoj arhitekturi, do harmonijskih odnosa Renesansne arhitektonske forme koja kroz humanistički pristup okrenut čovjekovoj perspektivi i vizuri teži ka beskonačno dalekom horizontu.

Geometrijska proporcija kao odnos dva omjera, diskontinuirana i kontinuirana, uz aritmetičke i harmonijske proporcije predstavlja osnovu kompozicionih odnosa prostornih cjelina u umjetnosti i arhitekturi, sve do savremene moderne arhitekture. Uz ove tri proporcije izdvajaju se proporcije zlatnog reza i Fibonačijev niz, kao specifični proporcijski sistemi beskonačne progresije. Proporcijski sistem koji predstavlja odnos podjele duži na dva dijela, tako da je razmjera većeg dijela i cjeline jednaka odnosu manjeg dijela prema većem, poznata kao "zlatni rez", reprezentirajući sistem neprekidnog dijeljenja, u nekim historijskim periodima bila je predmetom naglašenog interesovanja zbog svojih specifičnih svojstava, kao geometrijska reprezentacija beskonačnosti i neizmjernosti.

¹²⁵ Dan, Pedoe. Geometry and the liberal arts. St. Martin's Press, New York, 1976. pp. 103-175.

Proporcija "zlatnog reza" se ne može izraziti racionalnim brojem, već samo relacijom kompleksne povezanosti cjeline i dijelova u jedinstvenom razmјernom odnosu. Ovoj proporciji pripisivana je izuzetna estetska kvaliteta, naročito u renesansnoj arhitekturi. Proporciji zlatnog reza često se pripisuje jedinstvena uloga univerzalnog prirodnog proporcijskog sistema.



Slika 106.

Proporcija zlatnog reza u pentagonalnoj formi.

*Zlatni rez u proporcijama vezanim za geometriju pentagona
Osnova vile Farnese, Caparola, Giacomo Barozzi da Vignola, XVI st.*

Platonistička koncepcija estetike koja je utjecala na Zapadnu umjetnost i arhitekturu, zasnivala se na sistemu proporcije kao kompozicije upravljane dinamičkom simetrijom, sistemom proporcija u međusobnoj korelaciji, kao prostornom korespondencijom muzičkom ritmu u vremenu, zasnovanom na koncepciji Pitagorejske muzičke harmonije.¹²⁶

¹²⁶ Mathyla, Ghyska. *The Geometry of art and Life*. Dover Publications, New York, 1977. pp. 5-6.

Pojam ritma vezuje se uz dinamička svojstva proporcijskih sistema kao simetrije nekog cjelokupnog prostornog sistema.¹²⁷ Geometrijska proporcija u klasičnoj Grčkoj zasnovana na odnosima dvije veličine, kao Grčki izraz "analogia", koja se ritmički ponavlja i prenosi, predstavljala je princip simetrije o kojem piše i Vitruvije.¹²⁸ Ovakva simetrija se razlikuje od standardnog pojma simetrije koji se kasnije ustalio odnoseći se uglavnom na bilateralnu simetriju kao odnos polarizirane jednakosti ili ponavljanje jednakih elemenata.

Pojam ritma vezan je za kontinuirani tok transformacija koje uključuju i transformacije sličnosti a ne samo podudarnosti, time obuhvatajući ne samo ponavljanja nekog elementa već i ponavljanje razlika kroz progresiju i gradaciju transformacija.



Slika 107.

Ritam i proporcija u arhitektonskoj prostornoj kompoziciji .

Dorski red, Partenon, Atena, 5. st. p.n.e.

¹²⁷ Rhythmos i Arithmos u klasičnom grčkom jeziku potiču iz korijena riječi rhein - tok. M. Ghyka, *The Geometry of art and Life*. 1977. p. 5.

¹²⁸ P. M. Vitruvius. *De arhitektura libri decem - Deset knjiga o arhitekturi*. 1999. knjiga 1

Proporcijski sistemi klasične Grčke geometrije često nisu bili rezultat fiksnih geometrijskih odnosa već su proizilazili i iz percepcijskih predstava, intuitivnih osjećaja za sklad i harmoniju odnosa različitih formi i relacija njihovih veličina. Relativna mjera ili proporcija klasične Grčke geometrije, mnogo je bliskija kvalitetima prostora koje čovjek prima svojim čulima od standardizirane uniformne metričke mjere modernog doba. Sistem određivanja veličina našeg perceptivnog aparata sistem je relacionih mjeru, odnosno dinamičan proporcijski sistem.

Svaki historijski period u arhitekturi odlikovao se i različitim principima mjerena i proporcije dijelova, rezultirajući i nekim određenim stilskim redovima. Arhitektonski prostorni kanoni koji su bili utemeljeni u proporcijским sistemima, često su historijski bili prevaziđeni novim kontekstualnim okvirima. Proporcijski sistemi mogu predstavljati osnovu stvaranja fiksnih prostornih konglomerata umjesto harmonijske cjelovitosti, ukoliko su rezultat gubljenja uvida u njihove dinamičke i transformacijske potencijale.

Klasični pojmovi povezivali su proporcijске i simetrijske odnose u jedinstvenu dinamičku cjelinu, koji su u određenim periodima postajali pojednostavljeni i razdvojeni, što je ograničilo fleksibilnost i adaptabilnost u dinamičkim promjenama okoline. Klasični pojam dinamičke simetrije povezan sa pojmom proporcije, koji se razlikovao od kasnije ustaljenog značenja simetrije kao sistema koji uspostavlja fiksirane i staticne oblike, danas je ponovno aktualan, povezan sa razvojem novih oblasti geometrije koje obuhvataju kompleksne dinamičke prostorne strukture.

5.1.2. Geometrijski principi simetrije u arhitekturi

Simetrija je uslov stvaranja pravilnih geometrijskih formi i tijela. Pravilne forme su temeljni oblici geometrije, a njihovo otkriće u najstarijim ljudskim kulturama pripisuje se intuitivnom osjećaju za red i simetriju. Kvadrat, krug, trougao, geometrijski su likovi idealne simetrije, pa su oduvijek predstavljali pojam univerzalne savršenosti.

Simetrija predstavlja kvalitativno svojstvo nekog sistema, uređujući neku strukturu u stabilnu cjelinu. Simetrija je princip uravnoveženja neke strukture i kao takva uslov je za stvaranje stalnih oblika čvrstih i stabilnih fizičkih tijela. Uslov za stvaranje jedinstvenosti i stabilnosti cjeline sačinjene od više elemenata, određena je vrsta simetrične organizacije.

Simetrični oblici molekula i kristala u prirodi, posljedica su kvantnih zakona simetrije, kojima se ukida individualnost u sistemu jednakih elemenata, tako da se svojstva cjeline ne mogu obuhvatiti jednostavnim zbirom pojedinačnih čestica.¹²⁹

Rigidne strukture kristala kao rezultat principa simetrije ocrtavaju generalne zakone simetrije. U anorganskim sistemima prevladava kubična i heksagonalna simetrija, i uz kuboktaedralnu simetriju predstavljaju jedine tipove simetrije moguće u anorganskim kristalnim sistemima, omogućavajući pravilnu jednoliku podjelu prostora. Zakon entropije koji vlada fizikalnim sistemima sa ovakvom simetrijom postiže stanje najveće vjerovatnoće i najmanje potencijalne energije, kao stanje ekvilibrijuma i statičnosti.¹³⁰

¹²⁹ Ivan, Supek. *Nova fizika*. Školska knjiga, Zagreb, 1966. pp. 285-287.

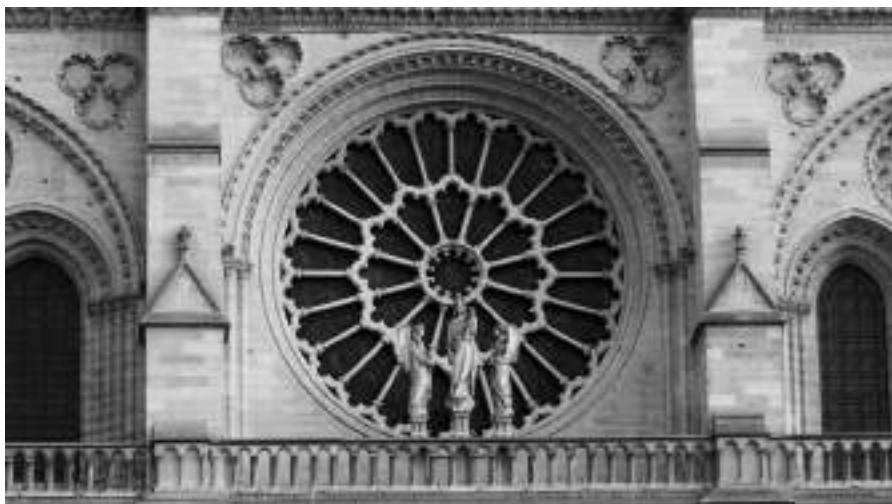
¹³⁰ M. Ghyka. *The Geometry of art and Life*. 1977. p. 88.

Živi organizmi razlikuju se od anorganskih upravo strukturom simetrične organizacije, sa predominantnom ulogom dinamičkih simetričnih sistema, pentagonalne simetrije u ravni i dodekaedrom kao trodimenzionalnim prostornim aranžmanom. Proporcija zlatnog reza kao najjednostavniji vid kontinuirane geometrijske proporcije, reguliše sukcesiju samosličnih oblika u kontinuiranoj progresiji. Povezanost proporcije zlatnog reza i pentagonalne simetrije ne daje ujednačenu homogenu podjelu prostora, već ocrtava asimetrijsku samosličnu organizaciju prostornih formi rasta, razvoja i razgradnje u prirodnom svijetu, nazvanih homotetičkim ili gnomonskim rastom.¹³¹

Princip simetrije jedan je od temeljnih principa oblikovanja i komponovanja prostornih formi i u djelima čovjeka. Simetrične geometrijske figure i tijela osnovni su kompozicioni elementi arhitektonskih formi, bilo u tlocrtnoj dispoziciji ili vanjskom izgledu objekta. Najzastupljeniji je tip osne simetrije, koji je u starijim epohama arhitekture jedan od osnovnih kompozicionih principa. I ostali poznati tipovi geometrijske simetrije: centralna, rotaciona, translaciona i klizna, mogu se naći u različitim vidovima u pojedinim detaljima ili generalnoj formi arhitektonskog objekta. Principima simetrije svi detalji i kompozicioni elementi dovode se u ravnotežu i balans, usklađeni u jedinstvenu sistemsku cjelinu.

Ne samo na planu cjelovitog rješenja arhitektonskih objekata, već i na manjim detaljima, kao što su: prozorski otvori, podovi, ograde, stropovi, pa do ornamentalnih ukrasa, mogu se naći različito kombinirani tipovi simetrije. Zakonitosti uređenosti detalja identični su zakonitostima prostorne organizacije cjelokupnog objekta, čime je ostvarena prostorna jedinstvenost i cjelovitost.

¹³¹ M. Ghyka. *The Geometry of art and Life*. 1977. p. 91



Slika 108.

Principi simetrije u arhitektonskim detaljima.

Rozeta katedrale Notre - Dame, Pariz, XII-XIV st.

Najširu primjenu složenih vrsta simetrije možemo naći u geometrijskom ornamentu, koji je u arhitekturi igrao često veoma značajnu ulogu u estetskom oblikovanju površina, ivica, pa i vizualne kompozicije cjelovitog objekta.

"Ornament" je širok pojam i često obuhvata sve nefunkcionalne detalje nekog objekta, ali se porijeklo ovog pojma vezuje uz pojavu geometrijskih uzoraka, kojima su se još u najstarijim ljudskim civilizacijama ukrašavala djela nastala rukom čovjeka. Pojava ornamenta vezuje se u nekim teorijama za tzv. strah od praznine kao praznog prostora (*horror vacui*), pa su glatke površine ispunjavane, strukturirane tačkama, linijama, geometrijskim likovima: krugovima, trouglovima, meandrima,... Iako se nekim ornamentalnim motivima pridaju različita značenja i simbolika, uloga ornamentacije neke površine vezana je prvenstveno uz njen generalni vizualni efekt. Ornament na dovoljnoj udaljenosti daje utisak teksture, dajući određenu vizualnu strukturu nekoj površini.

Po Ovnu Jonesu "tajna uspjeha u svakom ornamentu je proizvođenje širokog generalnog efekta ponavljanjem nekoliko jednostavnih elemenata", a varijabilnost se ne postiže mnogostrukim variranjem elemenata već njihovom organizacijom i aranžmanom.¹³² Generalni efekt ornamenta nastaje kao posljedica složenog geometrijskog principa simetrije, višestruko primijenjenog u kompoziciji osnovnih elemenata. Ornamentirana površina ne sagledava se kroz svaki pojedini detalj, već kao kompleksna i jedinstvena cjelina.

Vizualni efekti simetričnih geometrijskih kompozicija istraživani u radu E. Gombricha i R. Arnheima¹³³, daju dokaz o ulozi principa simetrije u vizualnoj percepciji prostornih oblika i formi. "Simetrija izgleda širi naše polje vida, naš vizualni raspon."¹³⁴ Vizualni efekti geometrijskog ornamenta prevazilaze funkciju ukrašavanja, jer su vezani uz perceptivne zakone kojima su determinirani oblici, veličine, granice prostornih oblasti i teksture. Ornamentalni geometrijski uzorci strukturiraju površinu dajući joj teksturu, a time i određeno mjerilo. Različitim površinama mogu dati karakter objedinjenosti i jedinstvenosti.

Kompozicije geometrijskih elemenata korištene u ornamentici, usko su vezane za prirodne zakone koji se zasnivaju na principima simetrije. Istovrsni principi simetrije koriste se i u prostornoj kompoziciji cjelovitog objekta, kao i u kompoziciji detalja, pa sve do ornamenta kao "umjetne" teksture, prenoseći tako istovrsne geometrijske zakonitosti kroz različite skale veličina. Na ovaj način objedinjuju se različite arhitektonske prostorne strukture i podstrukture u jedinstvenu cjelinu.

¹³² Oven, Jones. *The grammar of ornament*. Dorling Kindersley Book, London, 2001. p. 35.

¹³³ Ernest, Gombrich. *The sense of order*. Nolit, Beograd, 1979.

Rudolf, Arnheim. *Umetnost i vizualno opažanje*. Univerzitet umetnosti, Beograd, 1987.

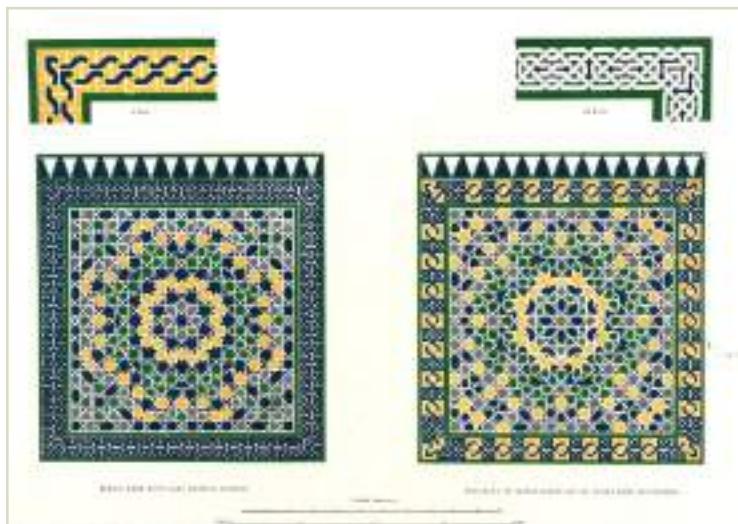
¹³⁴ R. Arnheim. *Umetnost i vizualno opažanje*. 1987. p. 126.



Slika 109.

Karakteristični ornamentalni uzorci primitivnih tribalnih društava i drevne egiapske kulture;

Ilustracije iz knjige Ovena Jonesa:
The Grammar of Ornament.¹³⁵



Slika 110.

Ornamentirane površine kao rezultat složenih geometrijskih principa simetrije.

Palata Alhambra, Granada,
XIII / XIV st.

¹³⁵ Owen, Jones. *The grammar of ornament*. 2001.

Primjena geometrijskog ornamenta, zadržala se u određenom vidu i u modernoj arhitekturi, iako se često smatra da je jedna od njenih najuočljivijih karakteristika upravo odbacivanje ornamenta kao nefunkcionalnog detalja. Geometrijska jednostavnost oblika naglašena simetričnim rasporedom konstruktivnih rastera, vidljivih i u vanjskom izgledu objekta, na neki način daje geometrijsku ornamentalnost, u mjerilu koje se sagledava sa daleko veće udaljenosti ili sa daleko većim brzinama kretanja, kao karakteristikom moderne civilizacije.¹³⁶

U geometrijskom ornamentu princip simetrije nije estetski efektni ukoliko se radi o jednostavnom ponavljanju elemenata, već je bitan princip njihovog hijerarhijskog i složenog načina organizacije, tvoreći kompleksnu cjelinu različitih nivoa i vrsta reda. Geometrijski ornament poput muzičke kompozicije stvara kompleksne harmonije ritmova i različitih prostornih sekvenci koje su međusobno povezane u jednu cjelinu.

Geometrijska ornamentacija oslanja se na metode geometrijske determinacije i složene dinamičke organizacije prostora koji u savremenim pristupima generiranja forme uz pomoć računarske tehnologije, postaju fundamentalni principi modeliranja i kreacije prostornih sistema. Značaj geometrijskog ornamenta danas se ne posmatra samo u estetskom ili vizualnom smislu, već u smislu otkrivanja i istraživanja generativnih potencijala specifičnog sistemskog geometrijskog ustrojstva složenijih prostornih sistema.

¹³⁶ Zinaid, Raljević. Korelacija geometrijskih i psiholoških faktora u procesu oblikovanja arhitektonskog prostora, Doktorska disertacija. Arhitektonski fakultet, Sarajevo, 1990.

5.2. GEOMETRIJSKI ASPEKTI KARAKTERISTIČNIH PROSTORNIH KONCEPCIJA U ARHITEKTURI

Predstavljajući realizaciju čovjekove prostorne imaginacije, arhitektura se razvija u korelaciji s razvojem filozofskih, naučnih i kulturnih misaonih obrazaca. Ovaj razvoj rezultira i formiranjem različitih prostornih koncepcija kroz različite kulture i historijske epohe, unutar kojih je određen i karakter arhitektonskog prostora. Prostorne koncepcije u arhitekturi obuhvataju niz raznovrsnih aspekata, od religijsko-filozofskih, socioloških, geografsko-topoloških, do matematsko-geometrijskih. Svi ovi aspekti su međusobno povezani i svojom isprepletenošću daju prepoznatljivu prostornu formu, po kojoj se definiraju pojedini periodi u istorijskim i civilizacijskim razdobljima, kao različiti stilski periodi u razvoju arhitekture.

Koliko su prostorne arhitektonske koncepcije bile plod promišljenih prostornih sistema, a koliko rezultat tradicionalnih empirijskih metoda građenja i konstruktivnih mogućnosti uslovljenih dostupnim građevinskim materijalom, teško je razgraničiti, ali je određenu, često veoma bitnu ulogu, igrala geometrijska prostorna imaginacija, odnosno geometrijski prostorni koncepti i modeli. U praktičnim tehničkim djelatnostima geometrija se u striktno matematiziranom vidu primjenjuje u sklopu mehanike, statike i ostalih fizikalnih aspekata inženjerstva, dok se u kreativnom prostornom oblikovanju i dizajnu geometrijski koncepti koriste u mnogo slobodnijem obliku, istražujući estetske kompozicione i izražajne mogućnosti geometrijskih formi i strukturnih obrazaca.

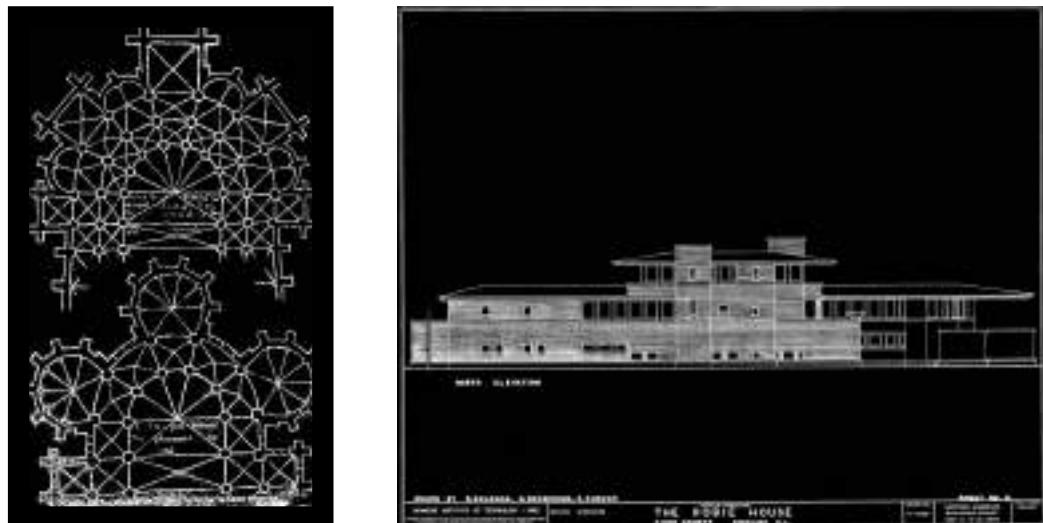
Geometrijski koncepti prostora vezani su uz formiranje mentalnih modela koji definiraju uređen i jedinstven koncept prostora osnovan na univerzalnim logičkim odnosima i principima uređenosti koji obuhvataju geometrijske prostorne arhetipove i relacijske odnose. Geometrijski koncepti prostora obuhvataju prostorne sisteme formirane na principima strukturiranja prostora koji omogućavaju kvantitativno i kvalitativno diferenciranje i limitiranje ovih sistema.

Različite civilizacije, kao izraz određenog kulturno-historijskog stepena razvoja ljudskog društva, ostavile su iza sebe tragove arhitektonskih djela koja svjedoče o različitim koncepcijama na kojima se temelje prostorne forme i strukturni sistemi koji definiraju arhitektonski prostor. Osnovni kvaliteti različitih geometrijskih koncepcija mogu imati višestruka značenja i tumačenja u konkretnom prostoru, pa je njihovo potpunije poznavanje preduslov za kreativan i originalan pristup rješavanju prostornih problema.

Geometrijska apstrakcija primijenjena u procesu generiranja prostornih formi u arhitekturi razvija se kroz dva principa koji se provlače kroz razvoj arhitekture, često paralelno ili naglašavajući jedan odnosno drugi. Prvi princip "odozgo na dole" (engl. izraz top-down), gdje jedan osnovni princip u vidu generalne konfiguracije daje jedinstvo konstitutivnim dijelovima, naglašava jedinstvenost i racionalnost generalne forme objekta, koja determinira položaj i vezu među sekundarnim dijelovima često hijerarhijski povezanim. Drugi princip nazvan "odozdo-na-gore" (engl. bottom-up), ponavljanjem dijelova po jedinstvenom principu stvara sistemsku cjelinu dijelova, povezujući dijelove kroz ponavljanja i organizaciju datu nekim pravilom.¹³⁷

¹³⁷ Farshid, Moussavi. *The Function of Form*. Harvard Graduate School of Design/Actar, 2009. p. 28.

Prateći i analizirajući razvoj prostornih koncepcija u najvažnijim periodima razvoja ljudske civilizacije i arhitekture, mogu se uočiti različiti tipovi prostornih relacija i oblika koji se odražavaju u vidu zatvorenih ili otvorenih, koncentrisanih ili razvijenih formi, homogenih ili nehomogenih struktura, simetričnih ili asimetričnih prostornih sistema, kontinuiranih ili diskontinuiranih sklopova, statičnih ili dinamičkih prostornih kvaliteta. Ove karakteristike uslovljene su i određenim kvalitetima geometrijskog koncepta prostora kojim su određene.



Slika 111.

Različiti tipovi prostornih formi u arhitekturi sa određenim kvalitetima geometrijskih koncepcija.

Srednjevjekovna arhitektura:
Villard de Honnecourt, arhitektonska skica (oko1230);

Moderna arhitektura: F. L. Wright, Robie House, Chicago, 1909/10.

5.2.1. Prostorni geometrijski koncepti drevne i klasične arhitekture

Naglašavajući cikličnost prirodnih procesa, red, stabilnost i harmonija prožimaju kontinuitet svijeta i života kroz cjelokupnu filozofiju, religiju i umjetnost drevnih civilizacija.

Egipatska civilizacija i kultura kao najizrazitiji primjer ovakve koncepcije svijeta, odlikuje se dugotrajnošću i stabilnošću, u periodu oko 5.000 godina. Prostorni koncept otjelovljen u arhitekturi Egipatske civilizacije, proistekao iz navedenog koncepta univerzuma, odlikuju stabilnost i naglašena statičnost formi.

Arhitektura ovog perioda karakterizirana je punim volumenima zida, stuba, grede i praznog prostora ograničenog ovim elementima. Prostorne forme su kompaktne, koncentrisane, jasno su determinirane svojim granicama. Paralelopiped, zarezana piramida i piramida, kao oblici jasnih i pravolinijski orijentiranih granica, karakteriziraju prostorne forme, a u osnovi su to pravougaonik, trapez, kvadrat. Arhitektonski prostor je zatvorena forma, ograničena ravnim segmentima zidova i tavanica, manifestirana u vidu prostornog tijela.

Egipatsku kulturu karakterizira razvoj kanona koji utvrđuju načine i mogućnosti prikazivanja formi i oblika svijeta. Determinizam i nepromjenjivost ovih kanona omogućavaju očuvanje i trajnost informacija kroz veoma duge periode, sa malim mogućnostima izmjene, što doprinosi kontinuitetu i postojanosti cjelokupne kulture.

Prostor egipatske arhitekture je stabilan i statičan, sastoji se iz punih oblika i praznine između njih, oblici su pravilni, kombinovani u simetričnim relacijama, realizirajući fiksan prostor oko sebe. Ovakav prostor je diskontinuiran, a kontinuitet se ostvaruje slijedom prostornih elemenata (nizanjem), trajnošću oblika i kanonizacijom njihovih uzoraka, utvrđenih jednostavnim geometrijskim zakonitostima.



Slika 112.
Prostorne forme klasične Egipatske arhitekture.
Izidin Hram, File, Egipat, oko 280. g. p.n.e.

Klasična Grčka arhitektura, prožeta je naukom i filozofijom, s jedne strane zastupljene Platonskom školom koja je okrenuta idealnom, stabilnom, matematski određenom svijetu, a s druge strane Aristotelovom empirističkom filozofijom koja se bavi pojavnim opaženim svjetom promjene, nastajanja i nestajanja.

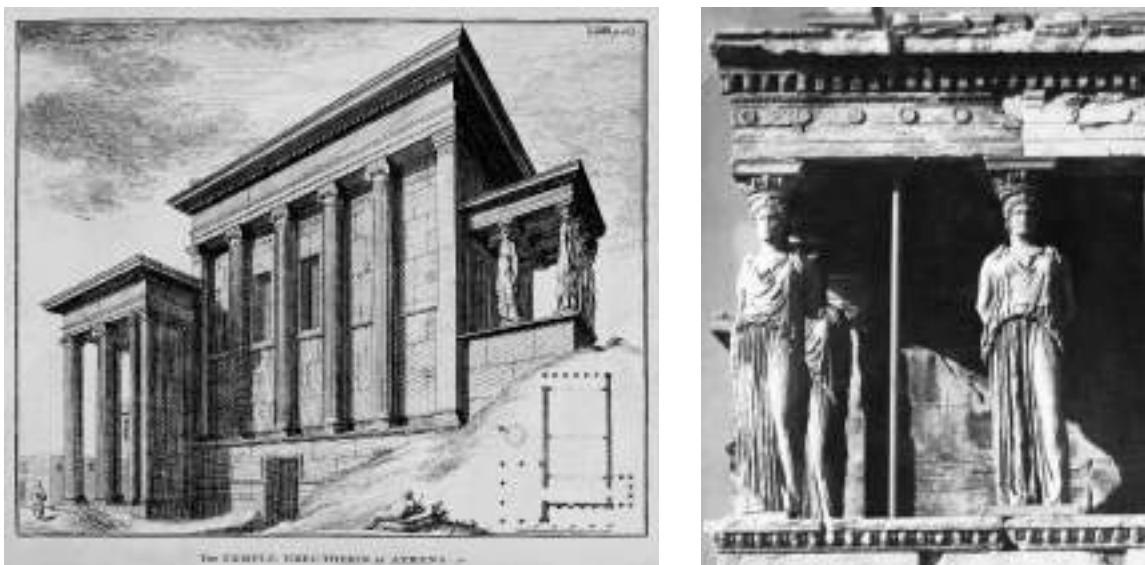
Prostorna koncepcija klasične grčke arhitekture objedinjuje formu, funkciju i konstrukciju.¹³⁸ Unutarnje jedinstvo definirano je iznutra, osnovnim prostornim uzorkom kao mjernim modulom koji prožima strukturu cjelokupnog objekta, od njegovih dijelova do ukupne cjeline. Mjera predstavlja konstantu koja objektu daje cjelovitost i stabilnost i povezuje ga sa čovjekom i prirodom.

Elementi prostora su tretirani kao tijela – cjeline sastavljene od dijelova, koji su usklađeni sa sveukupnom cjelinom mjernim modulom i proporcijskim sistemima koji usklađuju odnose dijelova naspram cjeline. Objekt grčke arhitekture manifestira organsko jedinstvo svih dijelova u savršenoj harmoniji utjelovljenoj u proporciji. Možemo reći da je grčka filozofija, umjetnost pa i arhitektura u biti antropomorfna. Spoljni izgled arhitektonskog objekta je naglašen, dok je unutarnji prostorni sklop podređen, poput ljudskog tijela u čijem je vanjskom izgledu grčka umjetnost nalazila izvor najviše ljepote, sklada i savršenstva.

Prostorna forma s jedne strane zasnovana je na geometrijskoj prostornoj determinaciji, na pravim linijama, kombinaciji vertikala i horizontala, balansu i harmoničnoj, simetričnoj kompoziciji elemenata, a s druge strane na antropomorfnoj, čovječjem mjerilu prilagođenoj strukturi objekta, sa naglaskom na vizualne aspekte. Grčka arhitektura počiva na konceptu filozofije okrenute čovjeku, kao mjerilu svih stvari.

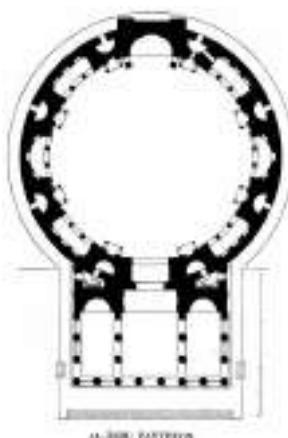
¹³⁸ Henri, Lefebvre. *The Production of Space*. 1991. p. 239.

Iako utemeljena na pravilnim geometrijskim oblicima i simetričnoj kompoziciji, prostorna koncepcija podložna je utjecaju vizualne intuicije, pa su geometrijske forme često korigovane (npr. neznatno iskrivljenje horizontalnih linija objekta karakteristično je za postizanje vizualnih efekata, uslovjenih specifičnostima u vizualnoj percepciji horizontalala). Vizualni karakter objekta odražava unutarnje sile koje djeluju između prostornih elemenata. Iako geometrijski racionalizirani, prostorni koncepti dozvoljavaju odstupanja od striktnе geometrijske pravilnosti – dopuštene su umjerene varijacije koje omogućavaju vizualnu harmonijsku jedinstvenost cjeline, koja nadilazi apstraktnu geometrijsku strukturu.



Slika 113.
Prostorne forme klasične Grčke arhitekture.
Hram Erechteion, Atena, 421- 406. p.n.e.

Arhitektura starog Rima, za razliku od klasične Grčke arhitekture koja red i balans podređuje čovjekovom mjerilu, čovjeka podređuje mjerilima koja nadilaze njegove individualne dimenzije. Prostorna organizacija odražava stabilnost i moć koju pruža racionalno i organizirano ustrojstvo društvenog sistema. Monumentalna skala gradnje, simetrija i distinkcija građevina koje se izdvajaju volumenima i odvajaju čvrstim zidovima od okoline, ograđujući prostor koji ima svoja unutarnja mjerila i dimenzije, neovisne o ljudskoj ili prirodnoj skali, oslikavaju geometriju koja postaje norma kojom je individualni život podređen višem, apstraktnom redu.¹³⁹ Jedinstvo forme nije bazirano na fiksnom unutarnjem jedinstvu već proizlazi iz generalnih principa, rezultirajući varijabilniminstancama.¹⁴⁰



Slika 114.
Prostorne forme klasične Rimske arhitekture.
Panteon, Rim, 113-126. g. n.e.

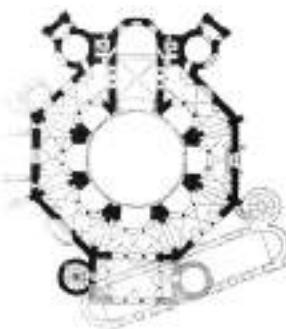
¹³⁹ Bruno, Zevi. *Architecture as Space: How to look at architecture*. Da Capo Press, New York, 1993. pp. 78-82.

¹⁴⁰ Henri, Lefebvre. *The Production of Space*. 1991. p. 239.

5.2.2. Koncept prostora srednjovjekovne zapadne arhitekture

Koncept prostora srednjovjekovne arhitekture zapadne kulture obilježen je kršćanskom idejom čovjeka kao refleksije univerzalnog bića. Arhitektonski prostor ekspandira longitudinalno ili radijalno, ne kao zatvoren ili izolovan, već otvoren prema nebu, obasjan svjetlošću.

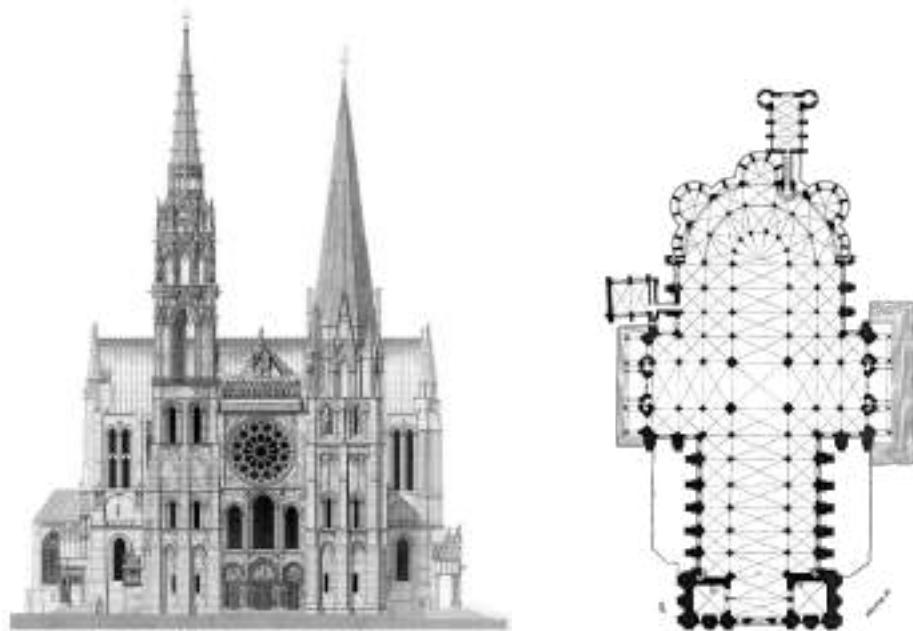
Prostor Bizantske arhitekture natkriva kupola, obuhvatajući horizontalnu i vertikalnu dimenziju prostora u neprekinutu cjelinu, povezujući pravolinjsku osnovu i zakriviljenu stropnu površinu. Zid nije granica pogleda već otvara put svjetlosti na unutarnji svijet koji postaje odraz vanjskog svijeta, ornamentiran i oslikan motivima koji povezuju zemaljsko i nadzemaljsko, sveto i profano u jedinstvenu cjelinu. Geometrija objekta postaje okvir stvaranja unutarnjeg prostora koji dobiva filigransku, organsku strukturu. Prostor postaje dinamična putanja kretanja, usmjeravajući kretanje i uključujući ga kao integralni dio prostora, povremeno ga zaustavljajući u kontemplaciji ili uzvišenoj emociji.¹⁴¹



Slika 115.
Prostorne forme Bizantske
arhitekture.
*Bazilika
San Vitale, RAVENA, VI st.*

¹⁴¹ Bruno, Zevi. *Architecture as Space: How to look at architecture*. 1993. pp. 85.88.

Prostor gotičke srednjovjekovne arhitekture baziran je na kozmološkoj filozofiji okrenutoj transcendentnom, odražavajući se na konцепцију prostora koja je utemeljena na principima neodređenosti, nesumjerljivosti i beskonačnosti. Ovi principi materijaliziraju se u arhitektonskom prostoru gotičke arhitekture "nestajanjem" površina i kompaktnih volumena. Prostor gotičke arhitekture se oblikuje tako da se, ne prekidajući njegov kontinuitet, površine raščlanjuju. Sve se pretvara u kompleksnu mrežu dinamičnih odnosa, smjenjuje se puno i prazno, naglašavajući organsku prepletenost i jedinstvo.

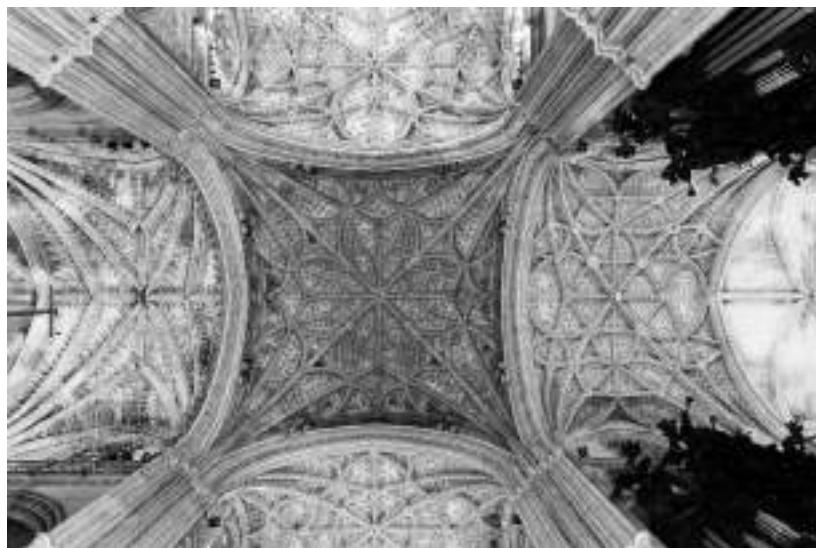


Sl. 116.

Karakteristične vizualne i strukturne forme gotičke arhitekture.

*Katedrala Notre-Dame, Chartres, XII. st.
- fasada i tlocrtna osnova.*

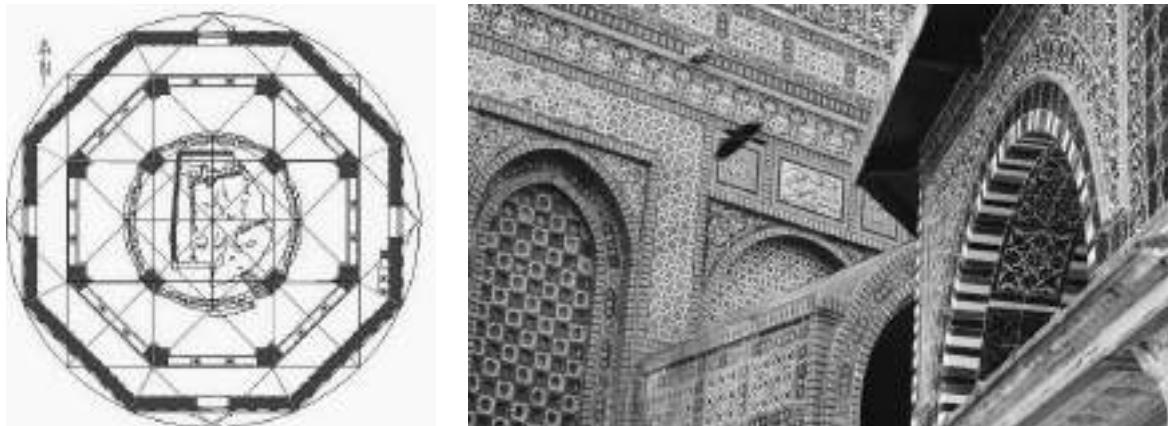
Napuštajući klasične principe ravnoteže i statičnosti, te razmjere usklađene s čovječjom skalom, u gotičkom konceptu prostora pojavljuju se napetost i neuravnoteženost, vizualna nejasnost, neodredivost i monumentalnost. Naglašena je povezanost komplementarnih odnosa racionalnog i iracionalnog, idealnog i iskustvenog, konačnog i beskonačnog, geometrije i strukturalne konstrukcije. Kompleksnost formi prevazilazi granice klasične geometrije, pa je vizualno izuzetno kompleksnim gotičkim prostornim formama pripisivan karakter iracionalnog i imaginarnog, kao nečeg logički neutemeljenog u racionalnim zakonima i idealnim formama geometrije. Zakoni geometrije su bili podloga proporcijskih i konstruktivnih odnosa ne samo kao racionalni već i kao naglašeni iracionalni odnosi, prožimajući strukturne i vizualne odnose u kompleksnom jedinstvu horizontalnog i vertikalnog plana, monumentalne skale prostornih veličina i minimalnih volumena materijalne strukture.



Slika.117.
Kompleksnost strukturne i
vizualne forme gotičke
arhitekture.
Katedrala u Sevilji, XVI st.
detalj stropa.ž

5.2.3. Islamska arhitektura i geometrijska koncepcija prostora

Islamska arhitektura naglašava apstraktnu dimenziju prostora kroz njegovu geometrizaciju koja dobiva univerzalni kozmološki značaj, prožimajući višestruke skale objekta u jedinstvenu cjelinu. Nefiguralni detalji kao što su arabeske, kaligrafija, mukarnas i složeni geometrijski obrasci islamske ornamentike neke su od glavnih karakteristika koje se vežu za islamsku arhitekturu. Repeticija i beskonačno ritmično ponavljanje ornamentalnih uzoraka pretvara površine u disperzne strukture, koje se preklapaju i pretapaju u jedinstvenu cjelinu. Detalj postaje dio prepletene beskonačne mreže, koja je uslovljena geometrijskim univerzalnim zakonima na kompleksan način, stvarajući univerzalne prostorne strukture.



Slika 118. Prostorne geometrijske forme i ornamentalni uzorci islamske arhitekture.

Plan i detalj džamije Kupola na stijeni. Jerusallem. VII st.

5.2.4. Prostorni koncepti renesansne i barokne arhitekture

Renesansna koncepcija prostora utemeljena je na dominaciji površine nad volumenom, s jedne strane tretmanom zida kao površine a s druge na linearnoj perspektivi, kao reprezentaciji trodimenzionalnih prostornih volumena na dvodimenzionalnoj slici sa individualnom, centralnom tačkom posmatranja.¹⁴² Prostor je centraliziran, racionaliziran i geometriziran idealnim strukturnim planom. Jedinstvenost i pravilnost prostornih oblika utemeljeni su u Euklidskom geometrijskom modelu u kome idealne geometrijske forme: krug, kvadrat, trougao, prave linije, glatke površine i naglašene horizontale, karakteriziraju prostorne planove. Elementi geometrije osiguravaju jedinstvenost, stabilnost i sigurnost, uspostavljajući međusobnu ravnotežu i potpunost.

Prostorni planovi unutar kojih su ukomponirani osnovni elementi, temelje se na proporcijskim sistemima koji pružaju matematsku perfekciju kompozicije. Prostorna metrika ograničava i označava prostor. Unutarnji i vanjski prostor su odijeljeni, a i prostorni kompozicioni elementi su međusobno nezavisni i odvojeni.

Nacrt determinira karakter forme objekta, koja se u funkciji konačnog vanjskog izgleda ne podvrgava strogo konstruktivnim silama ili spoljašnjoj sredini. Forme se zasnivaju na utvrđenim tipskim oblicima i kanonima matematski proporcionalnim, stvarajući tako jedinstven sistem oblika. Osnovna forma objekta je pojednostavljena, matematski i geometrijski jasno definirana, prevladavaju simetrični prostorni sklopovi, pojedini elementi javljaju se u serijskim, ritmičkim nizovima.

¹⁴² Sigfried, Giedion. Space, Time, Architecture. Harvard University Press, Cambridge, 1959. pp. 30-41.

Klasična Euklidska geometrija u renesansi je proširena na vizualni prostor, otkrivanjem perspektive, kao centralne geometrijske projekcije koja uvodi u vizualni prostor principe geometrije. Principi perspektive objedinjuju geometrijske elemente na jednom složenijem nivou od euklidske geometrije, uvodeći posmatrača u apstraktni geometrijski prostor. Na taj način klasičan geometrijski model prostora proširen je i preoblikovan, dobivajući mnogo kompleksniju strukturu. Uvodeći u dvodimenzionalni euklidski model treću dimenziju, kao prostornu dubinu, prostor centralne projekcije dobiva dinamičniji karakter, iako je utemeljen na klasičnim "statičnim" geometrijskim formama i relacijama simetrije.



Slika 119.
Prostorne forme renesansne arhitekture definirane perspektivnom slikom.
Fra Carnevale: *La Citta Ideale*, XV st.

Barokna arhitektura dinamizira arhitektonsku formu prelaskom iz pravolinijskih u zakriviljene, konkavne i konveksne površine, pretače mase u raščlanjene dinamizirane oblike. Ovalni, spiralni i slojeviti oblici i dramatični kontrasti, karakteriziraju prostorne forme i odnose.

S jedne strane barokna arhitektura se oslobađa racionalnih klasičnih geometrijskih determinanti prostora, a s druge strane poznavanje geometrijskih principa perspektive omogućilo je iluzionističko manipuliranje vizualnim prostornim aspektima, formirajući virtualni prostor oslikanim prizorima koji dočaravaju pokret u dubinu, time pokrećući čvrste površine zidova. Prostor barokne arhitekture je formiran i deformiran kontinuiranim transformacijama koje se prožimaju i prepliću stvarajući složene dinamičke cjeline.



Slika 120.

Prostorne forme barokne arhitekture: kupole.

Guarino Guarini: Sacra Sindone, Torino, XVII st.;

Francesco Borromini: San Carlo alle Quattro Fontane, Rim, XVII st.

5.2.5. Prostorni geometrijski koncepti moderne arhitekture

Modernizam je pojam koji je u 20. stoljeću postao njegovom najbitnijom odrednicom, prožimajući socijalne odnose, kulturu i arhitekturu. Za razliku od civilizacija u kojima je prošlost bila model budućnosti, a vrijeme cikličnog repetitivnog karaktera, modernistička misao još od Renesanse i perioda Prosvjetiteljstva odvaja se od prošlosti irreverzibilno se krećući naprijed, progresivnim napretkom u budućnost. Pojam modernizma ima dinamički karakter, vezujući se za predstavu vremena kao linearne progresije, čineći budućnost i sadašnjost različitim od prošlosti. Modernost se udaljava od prošlosti, kroz kontinuirani proces transformacije ustaljenih pravila i normi, stvarajući nova pravila.¹⁴³

Moderna arhitektura prekida vezu sa kozmološkim teorijama i na temeljima filozofije empirizma, utilitarizma i pozitivizma, formira prostor kao okvir određenih funkcija, kao što su stanovanje, kretanje i slično. Modernizam potencira racionalnost i povećanu apstrakciju, mehaničku produkciju i fragmentaciju socijalnog života na odvojene funkcije. Odbacuje kompleksnije forme vezane za kulturnu tradiciju i počinje od elementarnih formi, homogenizira i multiplicira klasične oblike geometrije, rušeći ustaljene vertikalne hijerarhijske sisteme, postavljajući ih u preklapajuće odnose. Forma postaje transparentna, fleksibilna i dinamična, naglašavajući strukturu i konstrukciju umjesto volumena.

¹⁴³ Hilde, Heynen. *Architecture and Modernity*. MIT Press, Cambridge, 1999. pp. 10 -11.

Utemeljena u filozofiji koja razumu kao sredstvu racionalnog mišljenja daje sposobnost da riješi prostorne probleme, prostorne koncepcije moderne arhitekture zasnivaju se na matematsko-geometrijskoj racionalnosti, na čistoći forme i jednostavnosti funkcije. Odbacujući sve "suvišno", sve što je komplikovano, iracionalno, intuitivno ili emocionalno, prostorni koncepti temelje se na sigurnosti, elementarnosti i "čistoći" geometrije.

Red, univerzalnost i vizualna jasnoća forme karakteriziraju prostorne forme moderne arhitekture, komponirane od primarnih geometrijskih elemenata oslanjajući se na geometrijski koncept beskonačnog, bezgraničnog prostora koji se širi ravnomjerno u svim pravcima. Prostor moderne arhitekture je diskontinuiran, decentraliziran, univerzalan i beskonačan prostor. Prostorni elementi su razdvojeni međusobno, odvojeni kao i njihove funkcije.



Slika 121.
Prostorna geometrija forme moderne arhitekture.
Mies van Der Rohe: Farnsworth house, Plano, illinois, 1945-51.

Apstraktna klasična geometrijska forma koja posebno u modernizmu isključuje predeterminirana historijska značenja, izlovala je arhitektonski objekt i iz prirodne okoline i iz socijalno-kulturne dimenzije prostora, namećući apstraktni red koji je fiksnim rješenjima postao prepreka dinamici generiranja nove realnosti. Univerzalnost prevazilazi granice lokalnog, tradicionalnog i historijskog, individualnog i osobnog prostora. Prostorna kreacija time postaje uniformna apstraktna prostorna matrica, primjenjiva u bilo kom prostoru i vremenu.

Iako temelje ima u klasičnom geometrijskom konceptu prostora, s naglaskom na ortogonalnosti, u modernoj arhitekturi se sreću geometrijski oblici i forme koji se suprotstavljaju klasičnom pojmu harmonije i ravnoteže kao statičnog stanja. Funkcija kretanja kao jedna od primarnih, stavlja i posmatrača u modernoj arhitekturi u pokret, bilo da se kreće po putanji unutar objekta - pomoću rampi i stepeništa, ili izvan objekta. Elementi prostora percipiraju se u serijacijama kao sekvence beskonačnog prostora. Giedion naglašava simultanost različitih vremenskih sekvenci i pogleda kao jedan od principa modernosti.¹⁴⁴

Prostorni koncepti moderne arhitekture su geometrizirani ali nisu statični, odnos prostornih elemenata je složen i dinamičan. Iako se često uz modernu arhitekturu veže rigidan pristup geometriji, u prostornim eksperimentima vezanim za pokret De Stijl kroz teoriju neoplastizma, uz logički sistem apstrakcije baziran na jednostavnim geometrijskim elementima, izbjegavajući simetriju i geometrijsku aksijalnost, forma je definirana kao rezultanta kontinuiranog procesa transformacija, uključujući transformacije volumena u površine i obrnuto, na simultano diferenciranim prostornim nivoima.

¹⁴⁴ Sigfried, Giedion. *Space, Time, Architecture*. 1959. p. 432.

Van Doesburg predlaže nove koncepte u arhitekturi koji nisu bazirani na klasično shvaćenoj euklidskoj geometrijskoj formi, već na interrelacijama koje formu uključuju u proces kontinuirane transformacije.¹⁴⁵ Forme koegzistiraju preklapajući se, tvoreći dinamičku cjelinu. Geometrijska varijabilnost oblikovnog izraza geometrijske forme nastaje kao rezultat sadržaja komponiranog od dijelova u nelinearnoj dinamičkoj interakciji različitih pogleda.



Slika 122.
Transformacija volumena u površine.
Theo Van Doesburg, projekt privatne vile, crtež u boji, 1923.

¹⁴⁵ Theo, Van Doesburg. Towards a plastic architecture. De Stijl, XII, 6/7, 1924.

5.3. STATIČNI I DINAMIČKI ASPEKTI ARHITEKTONSKE FORME

Ideja nepromjenjivog iza promjenjivog, idealnog i vječnog iza prolaznog, koja je u osnovi Platonističke filozofije, često se smatra istinskom prirodom geometrije. Felix Klein definira geometriju kao nauku koja proučava svojstva prostora koja su invarijantna (nepromjenjena) pod nekom datom grupom transformacija¹⁴⁶, potencirajući nepromjenjivost kao suštinu geometrijskog prostornog poimanja.

Geometrija s druge strane postaje prevodilac između konačnog i beskonačnog prostora, još od konstrukcija njenih generativnih apstraktnih zakona pomoću ravnala i šestara, preko konstrukcije vizualnog prostora slike koju čovjek sagledava iz jedinstvene subjektivne tačke posmatranja, geometrija spaja idealno i konkretno, jednakost i razliku, statične i dinamičke kvalitete svijeta.

Klasični statični geometrijski prostorni model kao idealan posrednik u kome se realiziraju bezvremene forme i prostorne strukture koje utjelovljuju nepromjenjivost i stabilnost, vezan je za pristup arhitekturi kao reprezentaciji statike, nepromjenjive forme i nepokretnе strukture. Elementarne geometrijske figure kao što su kvadrat, krug, pravougaonik, kao stabilne postojane geometrijske forme predstavljaju temeljne prostorne konfiguracije arhitektonskih planova. Prostorni sklopovi utvrđuju stabilnost preko pravog ugla kao simetričnog sistema dva pravca.

¹⁴⁶ Felix, Klein. A comparative review of recent researches in geometry, 1892-1893. pp. 215-249.

Statične prostorne strukture u arhitekturi imaju zadatak da se opiru promjeni, zadržavajući nepromjenjivu formu, bez obzira na vanjske utjecaje kojima je arhitektonski objekt izložen (vremenske promjene, seizmički poremećaji i drugo). Statične, zatvorene strukture, ne učestvuju u dinamičkom ritmu prirodne okoline, već mu se opiru i suprotstavljaju. Arhitektonski prostor je time izdvojen i zatvoren u odnosu na spoljašnji, prirodni prostor.

Arhitektonska gradnja unutar statičnog prostornog modela, ima za cilj izuzimanje i izolovanje što većeg prostornog volumena. Simetrične geometrijske forme, koje počivaju na linearnosti, horizontalnosti i vertikalnosti, na glatkim ravnim površinama jednake zakrivljenosti, obezbjeđuju uštedu gradivnog materijala, omeđujući najveće moguće volumene s najmanjom mogućom površinom. Ravnoteža i stabilnost u okviru ovakvog prostornog modela postignuti su linearnim, simetričnim rasporedom elemenata koji tvore prostorni sklop, tako da nijedan element nema neki poseban položaj u odnosu na drugi. Cjelokupna prostorna struktura sastavljena je kao kompozicija pojedinačnih elemenata, koji predstavljaju čiste, zatvorene geometrijske forme. Podudarnost elemenata i ritmično ponavljanje predstavlja osnovu njihove kompozicijske povezanosti u cjelinu.

U klasičnim geometrijskim koncepcijama prostorne forme tretirane su kao zasebni entiteti, svojim oblikom, mjestom i pozicijom.. Ove forme rezultat su geometrijske konfiguracije gradivnih elemenata i egzistiraju kao geometrijske figure i tijela klasičnog euklidskog prostora. Prostor je određen ili prazninom ili punoćom, razdvajajući ova dva prostorna stanja prostornim oblicima kao stabilnim, zatvorenim formama. Ovakav prostor definiran je relacionim odnosima oblika kao prostornih konstituenata, odnosno kao njihova ekstenzija.



Slika 123.

Arhitektonske forme kao statične geometrijske strukture odlikuju geometrijska pravilnost i simetrija.

Ludwig Mies van der Rohe: Kluczynski Federalna zgrada, Chicago, 1974.

Andrea Palladio: Vila La Rotonda, Vicenza, 1566-1590.

Izolacija i otpor promjeni kao izvor i uslov postojanosti i stabilnosti jedan je od temeljnih arhitektonskih zahtjeva. Prostorne forme u arhitekturi, kao statične strukture, odlikuju se kao izdvojene, čiste i vizualno jasne, geometrijski determinirane – linearne i simetrične prostorne strukture.

Karakter dinamičnog, kao onog što je podložno promjeni, u arhitektonskim prostornim formama vezuje se uz više različitih pristupa pojmu dinamike. Kakvim je sve promjenama podložna neka arhitektonska prostorna forma ovisi o načinu i obimu posmatranja i registrovanja te promjene.

5.3.1. Dinamički geometrijski prostorni koncepti u arhitekturi

Sam pojam forme najčešće se vezuje uz nepromjenjivost i stabilnost neke prostorne strukture, kojom ona dobiva trajan oblik, vizualno prepoznatljiv i uočljiv u odnosu na okolinu. Klasičan pojam dinamike, formi je davao mogućnost promjene u smislu linearнog kretanja, pri kome forma mijenja relacijske odnose sa okolinom, dok je sama forma nepromijenjena. U tom smislu arhitektonskim formama ne može se pripisati karakter dinamičkog, jer je stabilnost u odnosu na mjesto, odnosno nepokretnost u mehaničkom smislu linearнog kretanja, osnovna karakteristika arhitektonskih prostornih struktura.

Mijenjanjem pojma dinamičkog, koji razvojem naučne misli dobiva sve kompleksniji karakter, arhitektonske forme dobivaju i aspekte dinamičkog karaktera. Fiksni gradbeni plan i fiksne materijalne strukture po Zeviju nisu suštinske odrednice arhitekture. Pitanja suštine arhitektonskog prostora, koji nadilazi metričke strukture koje zatvaraju prostor kao statičnu nedefiniranu unutarnju prazninu, upućuju na dinamiziran prostor direktnog iskustva u realnom vremenu.¹⁴⁷ Integrisana realnost arhitektonskog prostora je u dinamičkom toku interaktivnog odnosa kojim se prepliću dinamički procesi na različitim prostorno vremenskim skalamama. Geometrija forme postaje geometrija dinamičkih procesa.

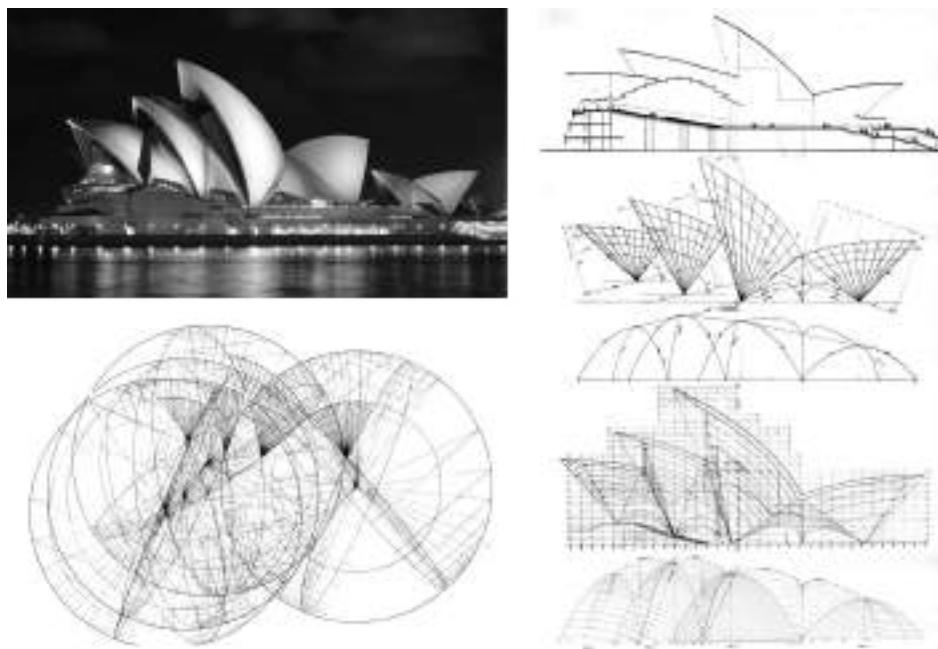
Otkrića u oblasti psihologije i percepcije, usmjeravajući pažnju na dinamički karakter opažanja, dokazuju da prostorna figura iako "nepomična" u mehaničkom smislu, može djelovati dinamički u vizualnom prostoru.

¹⁴⁷ Zevi Bruno, Architecture as Space: How to look at architecture. 1993. p. 23.

Pojedine prostorne konfiguracije daju vizualni stimulans oku koji predstavlja dinamične prostorne kvalitete. Svaka određena promjena u vizualnom sklopu predstavlja korelat nekoj vrsti kretanja, npr. promjena mesta nekog prostornog elementa, koja podrazumijeva pojavu podudarne forme u izmijenjenom položaju unutar nekog prostornog sklopa, izaziva pokret oka, koje prateći slijed ovakvih elemenata, prenosi vizualnu informaciju koja simulira kretanje u prostoru. Ovakav prostorni raspored elemenata daje vizualni efekt linearog kretanja u prostoru. Ritam i niz, kao jedna od prevladavajućih tema arhitektonske kompozicije, upravo potiču iz ovakvog vizualno-dinamičkog karaktera prostornosti.

Postoje i takvi vizualni efekti koji odgovaraju složenijim utiscima kretanja, koji se odnose na promjenu veličine nekog elementa ili promjenu broja identičnih elemenata. Promjena veličine neke geometrijske forme, predstavlja vizualni korelat pokreta u dubinu prostora, kretanja u treću dimenziju prostora. Otkriće perspektivne dubine, koja je uvijek naglašavana ritmičkim nizanjem perspektivno sve manjih elemenata istovrsnog strukturnog sklopa, rezultat je vizualno determiniranih dinamičkih geometrijskih struktura.

Dinamički vizualni karakter geometrijski jednostavnih prostornih formacija korišten je u kreiranju arhitektonskog prostora, u svim kulturama i stilovima, vjerovatno slijedeći intuitivni osjećaj i estetske potrebe proizašle iz psihofizioloških uslova percepcije. O vizualno uslovljenim dinamičkim kvalitetima samih elementarnih geometrijskih formi, takođe postoje neke studije koje ukazuju na složene vizualne procese kojima su uslovljeni opažaji ovih formi, ma koliko one "čiste" ili jednostavne izgledale, pa tako možemo govoriti o vizualno-dinamičkim aspektima pravougaonika, trougla, različitih uglova, različitih krivulja (luka, spirale i dr.), te određenih relacionih odnosa među njima. Spiralni oblici koji se mogu naći na svim skalama veličina u prirodi, rezultat su konstantnosti ritma dinamičke simetrije koja regulira zakrivljenost kroz kontinuiranu promjenu skale veličina.



*Slika 124.
Dinamički kvalitet
geometrijske forme zakrivljenih linija i površina.*

Jørn Utzon: Opera, Sydney. 1959-73.

U mnogim razmatranjima dinamički vizualni kvalitet se vezuje uz pokret, kao slijed ili smjer pokreta oka, slijed vizualnih informacija, smjer posmatranja i slično. Po Arnhajmu ovo predstavlja tradicionalni pogled na dinamički karakter percepcije, dok on dinamiku vizualnih oblika vidi u tzv. usmjerenoj napetosti sila vizualnog doživljaja. Ova napetost rezultat je deformacije, odnosno stvara se "podrazumnim prisustvom normativne osnove od koje oblik odstupa".¹⁴⁸

¹⁴⁸ Arnheim Rudolf, Umetnost i vizualno opažanje, 1987. p. 363.

Dinamički kvaliteti se pridaju određenim disharmonijskim odnosima, asimetriji, svakom poremećaju nekog reda ili obrasca, utemeljujući takav stav na nekim principima teorije informacijskih sistema. Definirajući neki sistem kao zatvorenu, statičnu strukturu, jedina moguća promjena postaje "iskakanje" iz sistema, izdvajanja nekog elementa veličinom, položajem ili oblikom u odnosu na ostale. Ovakav dinamički model najistaknutiju ulogu dobiva u dekonstruktivističkoj arhitekturi krajem 20. vijeka, temeljeći narušavanje geometrijske pravilnosti, ortogonalnosti i simetrije na potrebi za ostvarenjem dinamičnijih prostornih odnosa.



Slika 125.
*Dinamički karakter
dekonstrukcije geometrijske
forme.*
Daniel
Liebeskind:
Royal Ontario
Museum, Toronto, 2007.

Nova područja geometrije, kao što su neeuklidske geometrije i topologija, nadilazeći klasičnu euklidsku geometriju u ravni, nalaze svoj odjek i u koncipiranju i oblikovanju arhitektonskog prostora. Topološke i homeomorfne transformacije su fundamentalni principi dinamičke morfogeneze prirodnih formi. Povezujući biomehaničke i oblikovne principe sa jednim širim okvirom geometrijskih transformacija, utvrđen je homeomorfizam kao princip formiranja različitih varijantnih bioloških evolutivnih vrsta kao topološka sličnost srodnih vrsta.¹⁴⁹ Topologija svoju primjenu u nauci i umjetnosti nalazi od početka XX stoljeća a njen razvoj u primijenjenoj geometriji i inženjerstvu dolazi do izražaja razvojem informacijskih nauka i računarske grafike i modeliranja.

Kratak pregled pojedinih dinamičkih geometrijskih prostornih koncepata u arhitekturi, ukazuje na više značna tumačenja pojma dinamike, bazirana na različitim koncepcijama prostora, pa time i geometrije. Naučna misao kraja 20. i početka 21. stoljeća se okreće daleko kompleksnijoj dinamici koja se ne može prezentirati klasičnim modelima.

Na polju matematike razvijeno je mnoštvo novih tipova geometrija, pa je na širem tehničkom području primjene, a posebno u oblasti arhitekture i građenja, koje su usko vezane za prostorne geometrijske koncepcije, potrebno definirati šire i kompleksnije okvire koji bi obuhvatili probleme reprezentacije novih geometrija kako u konceptualnom tako i u praktičnom vidu. Neeuklidske geometrije i višedimenzionalni prostori, topologija i fraktalna geometrija, kao nova područja geometrije traže i odgovarajuće modele kojim bi bili inkorporirani u oblast arhitekture.

¹⁴⁹ Topološke transformacije bioloških formi su proučavane u radu D'Arcy, Thompson, *On Growth on Form*. University Press, Cambridge, 1942.

Razvoj računarskog informacijskog modeliranja uz razvoj računarske grafike omogućio je aktualizaciju i reprezentaciju kompleksnijih dinamičkih geometrijskih koncepata i modela, otvarajući nove potencijale u oblasti arhitektonske prostorne kreativne imaginacije i interpretacije.



Slika 126.

Kompleksniji geometrijski koncepti u arhitekturi aktualizirani razvojem računarskog informacijskog modeliranja.

Zaha Hadid: Željeznička stanica, Innsbruck, 2004 - 2007.

5.4. RACIONALNE I IRACIONALNE ARHITEKTONSKE FORME

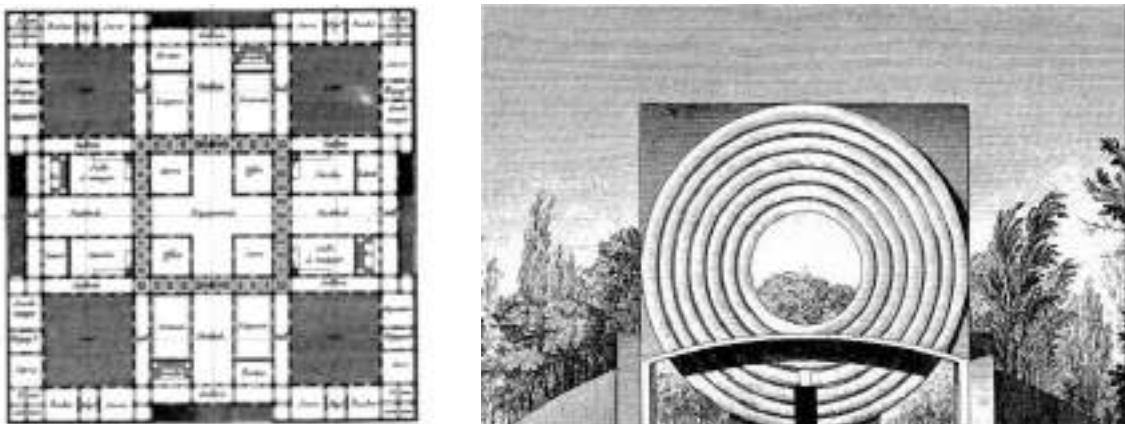
Različiti prostorni koncepti rezultirali su u arhitekturi različitim prostornim strukturama i formama. Uočavanje dvije naizgled suprotne generalne prostorne koncepcije, jedne racionalne, vezane uz pojam univerzalnog, idealnog i apstraktnog poimanja prostora, i druge iracionalne, vezane uz pojam intuitivnog, ekspresionističkog i individualnog, vezuju se uz pojedine razvojne stilove u arhitekturi, naglašavajući jednu ili drugu koncepciju. Tako se racionalna koncepcija vezuje uz egipatsku, grčku, renesansnu i modernu arhitekturu, dok se iracionalna vezuje uz gotičku, baroknu, arhitekturu romantizma i istočnjačku arhitekturu nekih kultura (npr. indijsku), te neke stilske tendencije u savremenoj arhitekturi.

Racionalna koncepcija prostora veže se uz geometrijski koncipiran prostor, koji je uglavnom podvrgnut zakonitostima euklidske geometrije. Pojam racionalnog odnosi se u užem smislu na kvantitativne odrednice forme – svođenje prostornih odnosa na neki određeni brojčani odnos (ratio). Mjera kao regulator prostornih odnosa, uređuje kompleksnije strukture kao cjelinu brojčano izraženih odnosa osnovnih gradivnih elemenata. Svaka kompleksnija cjelina predstavlja sumu sastavnih elemenata čiji se karakter ne mijenja i ostaje univerzalan, bez obzira na međuodnose i karakter cjeline.

Pod pojmom racionalnih prostornih formi u arhitekturi, podrazumijevaju se najčešće takve prostorne strukture koje su geometrijski determinirane u klasičnom euklidskom prostornom modelu i organizirane u cjeline klasičnim principima simetrije i proporcije.

Racionalno determinirane prostorne strukture formirane su polazeći od elementarnih geometrijskih figura i tijela, do složenijih geometrijskih formi. Naglašeni su simetrija i harmonija proporcijskih odnosa, statični karakter i odvojenost pojedinačnih elemenata, te vizualna jasnoća, kako dijelova tako i cjeline.

Racionalna prostorna kompozicija ostvaruje se uređenom organizacijom elemenata, jasno su naglašeni oblik i prostorna veličina (dužina, površina, volumen), razvijena linearost, što se sve može podvesti pod pojam geometriziranog arhitektonskog prostora.



Slika 127.
Racionalno geometrijski determinirane arhitektonske forme.
Claude-Nicolas Ledoux: Kuća krugova, projekt, 1790.

5. 4. 1. Iracionalne prostorne arhitektonske forme

Kao suprotnost racionalno koncipiranim formama, javljaju se u arhitekturi i tzv. iracionalne prostorne forme. Pojam "iracionalnih" formi je veoma širok i otvoren. Iracionalna prostorna koncepcija oslanja se na intuitivni, imaginativni pristup kreaciji prostora u arhitekturi, oslobođajući se geometrijskih ograničenja i zakona. Prevazilazeći i nadrastajući geometrijski klasični model prostora, ovakva prostorna koncepcija temelji se na ekspresiji i imaginaciji, individualiziranom emotivnom osjećaju prostora, vezanom uz prirodni svijet i osobnu egzistenciju u njemu.

Prostorne strukture proizašle iz iracionalne koncepcije, odlikuju se prepletenošću i povezanošću elemenata, nepravilnim ili nejasnim oblicima, nediferenciranim površinama ili volumenima. Dinamičnost i napetost, narušavanje simetrije, lomljenje pravaca ili njihov prelazak u krive linije, pojavljuju se zamjenjujući statičnost, simetričnost i linearност. Prostorne forme koje su proizvod ovakve koncepcije nisu determinirane kao suma odvojenih elemenata, već predstavljaju kompleksnu cjelinu koju čine isto tako kompleksne podcjeline.

Iracionalne arhitektonske forme svojom strukturnom složenošću prevazilaze okvire klasične euklidske geometrije, te su stoga tretirane kao proizvod proizvoljnosti ljudske imaginacije. Nesumjerljivost i vizualna nepravilnost i kompleksnost, ovakve forme kao proizvod intuitivnog osjećaja prostornosti približavaju prirodnim organskim formama. Ova nesumjerljivost posljedica je nedjeljivosti forme, koja je kao organska cjelina određena isprepletenošću i složenim uzajamnim odnosom elemenata.

Iako se geometrija veže za racionalnu koncepciju prostora, pojam racionalnog nadilazi kvantitativne odrednice. Kvantitativni racionalni odnosi izraženi brojem, u geometriji su dobili kompleksniji smisao, povezujući racionalne i iracionalne odnose u jedinstvenu cjelinu. Racionalnost je u svojim izvorima vezana za traženje jedinstva, ne samo kao jedinstva jednakog već i jedinstva različitosti. Obuhvatajući ne samo odnos manjeg prema većem, već i odnos konačnog prema beskonačnom, geometrija je odraz smislenog poimanja prostora koje nadilazi strukturiranost konačnim statičnim elementima kao prostornom sintaksom. Iako ne podliježu klasičnim geometrijskim zakonima, jedan dio arhitektonskih formi tretiranih kao iracionalnih i nepravilnih, mogao bi se strukturno sistematizirati i ukloputi u geometrijsku koncepciju koja bi bila zasnovana na novijim modelima geometrije. Jednim širim pristupom geometrijskom modeliranju kojim bi bili obuhvaćeni savremeni kompleksniji geometrijski modeli, racionalne i iracionalne arhitektonske forme mogu biti sintetizirane jednom generalnom prostornom koncepcijom.



Slika 128.
Iracionalne
arhitektonske forme.
Antoni Gaudi:
Casa Batllo,
Barcelona, 1904-06.;
Sagrada Familia -
detalj, Barcelona,
1882-

5. 4. 2. Organske prostorne arhitektonske forme

Pojam "organske arhitekture" odnosi se na prostorne koncepcije koje se oslanjaju na povezivanje arhitektonske forme sa prirodnim prostorom i oblicima nastalim djelovanjem prirodnih procesa. Danas je "organska arhitektura" reflektirana u različitim domenama; održive i bioarhitekture, alternativne, naturalističke ili ekološke arhitekture, u kojima se temeljno polazište arhitektonskog projekta zasniva na povezivanju arhitektonskog objekta sa prirodnim procesima i njihovim oblikovno-formativnim manifestacijama.

Postoji više različitih tumačenja i definicija pojma "organskog" u arhitekturi. Organsko se veže uz prirodni svijet, njegove formativne sile i oblike nastale djelovanjem ovih sila. Prirodni oblici predstavljaju veoma kompleksne vizualne sklopove u kojima je teško prepoznati jednostavne, elementarne geometrijske forme. Prirodne prostorne forme su jedinstveni funkcionalni i konstruktivni sistemi hijerarhijskog karaktera, čineći cjelinu koja je, iako sačinjena od zasebnih podcjelina, jedinstvena.

Organska arhitektura obuhvata određene vidove rekonstrukcije prirodnih oblikovnih procesa, od pojednostavljenog imitiranja morfologije vizualnih oblika u prirodi, do složenijih pristupa, ne u smislu imitiranja pojavnje slike prirodnih vizualnih oblika, već u smislu razumijevanja unutarnje strukture i procesa koji generiraju manifestirane oblike.

Organska prostorna koncepcija pripisuje se istočnjačkoj arhitekturi (Japan, Indija), djelomično i islamskoj, zatim gotičkoj, baroknoj, sve do moderne arhitekture gdje se vezuje uz arhitekturu Frank Lloyd Wrighta.

Pojam organskog provlači se u arhitekturi kroz različite stilove i periode, a u modernoj arhitekturi dobiva veoma široko značenje, predstavljajući jedan od pojmove kojim su obuhvaćeni različiti kompozicioni principi, bilo konstruktivni, funkcionalni ili oblikovni. Jedna od osnovnih karakteristika organskog pristupa je jedinstvenost funkcije, konstrukcije i estetike forme. Naglašena je jedinstvenost cjeline umjesto mnoštva dijelova.

Direktno inspirisan istočnjačkom arhitekturom, arhitekt F. L. Wright razvija teoriju organske arhitekture, koja se na određen način suprotstavlja čistom racionalizmu moderne arhitekture. Wright pojma organskog shvata kao veoma širok koncept, naglašavajući prije svega jedinstvenost arhitektonskih prostora i njegove okoline, vanjskog i unutarnjeg, oblikovnog i funkcionalnog.¹⁵⁰

Organska arhitektura nema pretenzije da bude stil imitacije morfologije prirodnih oblika, već način reinterpretacije prirodnih principa organizacije i njenih morfogenetičkih procesa. Arhitektonski objekt je ekvivalentan organizmu, ne kao nešto što ima vanjske karakteristike prirodnih oblika života, već kao integrisani entitet u kome je izraženo strukturalno jedinstvo svih dijelova; dijelova međusobno i prema cjelini, a cjeline prema svojoj okolini.

Organska arhitektura Wrighta počiva na jedinstvenim potencijalnim generativnim zakonima, u kojima su forma i funkcija povezane integrativnim procesima, koji su generator rasta objekta iznutra prema vani. Uz ovo shvatanje organskog, pojavljuje se potreba za geometrijskom predstavom koja bi omogućila planiranje organski koncipiranih prostornih struktura. Kompleksnost prostornih organskih formi ostvaruje se preko jednostavnih elementarnih geometrijskih struktura i transformacija ovih struktura u kompleksne kompozicione cjeline.

¹⁵⁰ Frank Lloyd, Wright. In the Cause of Architecture. The Architectural Record, no3. Vol XXIII. 1908. pp.155-165.

Prostorne forme F. L. Wrighta komponirane su od jednostavnih geometrijskih formi usklađujući konstruktivne elemente i funkcionalne cjeline u jedinstven, kompleksan prostorni sistem. Zadržavajući ortogonalne prostorne sklopove, primijenjen je određen konstruktivni modul koji se ponavlja u različitim formama, usklađujući konstruktivne elemente i funkcionalne cjeline. Kroz jedinstven strukturni sistema koji se razvija i multiplicira kroz vertikalne i horizontalne planove, formiran je prostor koji reflektira ovaj sistem i u dijelovima i u cijelosti. Detalji se kao osnovne teme, reflektiraju u većim prostornim sklopovima i u cjelokupnoj prostornoj formi, definirajući skalu veličina, dajući cjelovitost strukturi objekta.



Slika 129.
Organska prostorna koncepcija arhitektonske forme.
F. L. Wright: Fallingwater, 1936-39.

Geometrijska determinacija prostora koja bi bila korespondentna prirodnim morfološkim oblicima i njihovim strukturnim generativnim principima, u svjetlu današnjeg razvoja geometrije dobila je mogućnost reprezentacije u okvirima fraktalne geometrije, kao geometrije kompleksnih sistema koja u mnogim aspektima odražava prirodne procese. Mandelbrot skreće pažnju na forme u Euklidskoj geometriji tretirane kao amorfne, iregularne i fragmentirane, koje se mogu naći u prirodnom prostoru: oblaci, riječni tokovi, planinski krajolici... koje su u mnogim slučajevima u korelaciji sa fraktalnim geometrijskim strukturama.¹⁵¹

Prostor prirodne sredine je u neprestanom procesu nastajanja, dinamičkog razvoja i promjene, kao otvoreni sistem, zahtijevajući kompleksnije modele od klasične geometrije. Adekvatniji modeli koji mogu obuhvatiti i prostorne forme analogne prirodnim organskim strukturama mogu se naći u novim područjima kompleksnih dinamičkih sistema i njihovih matematičkih i informacijskih modela. Ovi modeli svoju konkretnu primjenu u oblasti arhitekture dobivaju praćeni novim medijem digitalizirane grafike i metodama informacijskog prostornog modeliranja.

¹⁵¹ Benoit, Mandelbrot. *The Fractal Geometry of Nature*. 1983.

6

KOMPLEKSNI GEOMETRIJSKI KONCEPTI U ARHITEKTURI

U arhitekturi krajem 20. stoljeća, javljaju se nove tendencije, prateći sve brži razvoj i sve kompleksnije potrebe civilizacije koja iz industrijsko-tehnološkog prelazi u informatičko doba. Suprotstavljajući se racionalnoj geometrijskoj determinaciji arhitektonskog prostora koju je nametnula moderna arhitektura, izbjegavajući geometrijsku racionalnost i savršenu "čistoću" elementarnih geometrijskih formi, arhitektonske prostorne koncepcije razvijaju se u nekoliko pravaca, karakterističnih po tome što predstavljaju izvjesno nadilaženje klasičnih geometrijskih prostornih koncepata i modela.

Potreba za kompleksnijim prostornim sistemima koji bi zadovoljili tehnološke zahtjeve s jedne i ekološke, psihološke i estetske potrebe s druge strane, u arhitekturi krajem 20. i početkom 21. stoljeća dovodi do različitih pristupa problemu formiranja arhitektonskog prostora. Postmodernizam, dekonstruktivizam i digitalna arhitektura, neki su od ključnih pojmove koji obilježavaju arhitekturu druge polovine 20. i prve decenije 21. stoljeća.

Postmoderni pristupi u arhitekturi, s jedne strane zasnivaju se u početku na povratku historijskom arhitektonskom nasljeđu i simboličkim aspektima forme, a sa druge na regionalnom i ekološkom tretmanu prostora. Povratak klasičnih arhitektonskih formi kao "citata" u ranoj postmodernoj arhitekturi, ili okretanje tradicionalnoj domaćoj arhitekturi pojedinačnih regiona, prelaze u dekonstrukciju klasične geometrijske forme i pojavu biomorfnih formi, kao pokušaja odstupanja od principa geometrijske apstraktnosti i univerzalnosti moderne arhitekture.

Ekološki principi, kao što su međupovezanost prostornih struktura na svim nivoima, cjelovitost i jedinstvenost prostornih sistema, ograničenje razvoja u okviru određenih nivoa i limita, odnosno ograničenje linearnog razvoja prostornih sistema, uz održavanje ravnoteže kroz organski razvoj i nelinearnu dinamiku uz samoregulaciju i samoodrživost kao prilagođavanje promjenama u okolini, postaju fundamentom arhitektonskih prostornih koncepcija.

Uključujući tehnološki i informacijski podržano planiranje, obradu, reprezentaciju i modeliranje svih faza arhitektonskog projektovanja i građenja, usklađivanje arhitektonskih koncepcija oblikovanja prostora sa zahtjevima savremene civilizacije nameće potrebu za kompleksnijim prostornim konceptima i širim strukturnim modelima koji bi nadilazili ograničenja klasične geometrije, ujedno pruživši mogućnost osmišljenog planiranja, modeliranja i materijalizacije prostornih sistema. Zahtjevi za kompleksnijim pristupima arhitektonskom prostoru, iskazani su u nekoliko prostorno-kompozicionih tendencija, koje se razvijaju u određene smjerove arhitekture od 80-tih i 90-tih godina 20. stoljeća, bazirane na ambivalentnim značenjima forme koja proizilaze iz komplementarnih interpretacija.

6.1. KONTEKSTUALNI, SLOŽENI I NIVELIRANI KARAKTER ARHITEKTONSKOG PROSTORA

Modernistička forma u arhitekturi tretirana je kao izolovana, stabilna, nezavisna cjelina, proistekla iz apstraktnih geometrijskih formalnih principa. Postmoderni pokreti u arhitekturi zasnivaju se na pristupu arhitektonskoj formi kao otvorenoj prostornoj strukturi, povezanoj sa okolinom u jedinstven kompleks.

Potreba za kontekstualnim jedinstvom arhitektonskog objekta, iskazana je u radu B. Brolina,¹⁵² 80-tih godina 20. st., kao preduslov povezanosti i otvorenosti arhitektonskog prostora. Kontekstualni okvir utiče na svaki pojedinačni objekt i obrnuto, što znači da postoji međupovezanost objekta i njegove okoline. Povezanost arhitektonskog objekta sa njegovom okolinom uslovljena je psihološkim, perceptivnim, kulturno-sociološkim, funkcionalnim i drugim faktorima. Psihološka istraživanja ukazuju na bitan utjecaj senzornih stimulacija iz okoline na motivacione procese, kao i na razvoj perceptivnih i kognitivnih funkcija. Psihosomatska ravnoteža ljudskog organizma dinamičke je prirode, ovisna o stimulansima iz vanjske sredine. Psihofiziološko funkcioniranje ljudskog organizma ovisno je i o prostornoj stimulativnoj informaciji iz spoljašnje sredine, pa bi bilo pogrešno odvajati prostorne i osjetilne kategorije. Arhitektonski prostor, kao faktor vanjske sredine postaje bitna komponenta jedinstvenog egzistencijalnog prostora, bilo na nivou pojedinačne individue ili ljudske zajednice.

¹⁵² Brent, C. Brolin. *Arhitektura u kontekstu*. Građevinska knjiga Beograd, 1988.

Isticanje kontekstualne povezanosti svakog pojedinačnog objekta sa njegovom okolinom, ukazuje na kompleksnu situaciju okruženja svakog arhitektonskog objekta, uslovljenu historijskim, kulturnim, estetskim i psihološkim kontinuitetima. Odbacujući izolacionizam i univerzalnost formi moderne arhitekture, postmoderna arhitektura prednost daje postizanju kontinuiteta, kao izrazu povezanosti svake posebne prostorne forme s njenim okruženjem. Kontekstualnost rane postmoderne arhitekture svodi se često na vizualno usklađivanje arhitektonskog objekta sa već postojećim historijskim objektima u njegovoј neposrednoј okolini. Širi smisao kontekstualne arhitekture označava nužnost povezanosti arhitektonskog objekta sa njegovom okolinom na različitim nivoima, bilo da se radi o vještački izgrađenoj okolini ili prirodnoj sredini.

Uz kontekstualnu prostornu povezanost javlja se u postmodernoј arhitekturi i zahtjev za prevazilaženjem apstrahovane geometrijske jednostavnosti, naglašavajući karakter složenosti prostora i prostornih formi. Složenost podrazumijeva prostornu diferenciranost, raznovrsnost formi i detalja, asimetričnost, različitost veličina, uz zadržavanje prostorne jedinstvenosti i cjelovitosti.

Robert Venturi, jedan od začetnika novog razmišljanja o prostoru, koje je dovelo do razvoja postmoderne arhitekture, u svome djelu "Složenosti i protivrečnosti u arhitekturi"¹⁵³ skreće pažnju na jedinstvo različitosti kao jedinstvo dvojnosi i protivrečnosti. Traženje jedinstva u suprotnosti, kao kreativan proces, za arhitektu znači odbacivanje čistih, jasnih formi i kanona i stavlja ga u poziciju neizvjesnosti, traženja, ispitivanja i usklađivanja složenih prostornih struktura u usaglašenu cjelinu.

¹⁵³ Robert, Venturi. *Složenosti i protivrečnosti u arhitekturi*. Grd. knjiga, Beograd, 1989.

"Arhitektura složenosti i suprotnosti ima posebnu obavezu prema cijelini...ona prije mora da otjelovljava teško ostvarivo jedinstvo uključivanja, nego lako jedinstvo isključivanja."¹⁵⁴

Prostorna složenost manifestira se kao multivalentnost i multivarijantnost prostornih struktura, uključujući naizgled suprotstavljene forme, odnosno komplementarne strukturne principe. Ovakva složenost ne znači razjedinjenost već predstavlja izvor jedinstva ostvarenog na jednom višem nivou, koji može biti realiziran na vizualnom, estetskom ili funkcionalnom planu. Po Venturiju "valjana arhitektura evocira mnogo nivoa značenja i kombinacija mnogih pristupa: njen prostor i njeni elementi postaju čitki i produktivni na više načina istovremeno."¹⁵⁵



*Slika 130.
Multivalentan izraz
postmoderne
arhitektonске forme.*

*Michael Graves,:
Portland Building,
Portland, 1982.*

¹⁵⁴ Ibid. cit. p. 31- 32.

¹⁵⁵ Ibid. p. 31.

Princip jedinstva složenosti u arhitektonskom prostoru donosi sintetički pristup tretmanu prostornih kvaliteta, objedinjujući naizgled suprotne pojmove: vani – unutra, otvoreno – zatvoreno, veliko – malo, izbočeno – ulegnuto, simetrično – asimetrično, kontinuirano – diskontinuirano, statično – dinamično. Jedinstvenost uključuje različite prostorne nivoje hijerarhijskog karaktera, bilo da se radi o jedinstvu komplementarnih principa, o jedinstvu pojedinačnog dijela i mnoštva ili o jedinstvu dijelova ostvarenog u vidu kontinuiteta.

Arhitektonske strukture složenog karaktera predstavljaju otvorenu, nedovršenu cjelinu. Stepen cjelovitosti može biti promjenjiv, jer dijelovi mogu biti fragmenti veće cjeline na različitim nivoima. Istovremenost opažanja mnogih nivoa kao cjeline, ne donosi lakoću i jednostavnost uočavanja jedinstva, već traži nešto više od analitičkog zapažanja strukturalnih karakteristika, traži po Venturiju "živo opažanje".¹⁵⁶

Uz složenost i fragmentaciju arhitektonskog prostora javlja se i prostorna nивелiranост, као линеарни дисконтинуитет. На недостатност линеарног приказа архитектонских концепција указује Jencks¹⁵⁷, наглашавајући мултивалентност архитектонског дела кроз постојање многих нивоа значења, те уочава дисконтинуиране токове као нивое егзистирања архитектонског објекта. Одређени егзистенцијални нивоји архитектонских просторних форми, по Šulcu су дефинирани као: ниво пејзажа, урбани ниво, ниво pojedinačnog objekta, ниво pojedinih просторија унутар објекта. Егзистенцијални простор као симултани totalitet, обухвата комплексно динамичко поље узјамног дјелovanja svih nivoa. Конкретизација виших остварује се помоћу нижих нивоа, па се успоставља одређена hijerarhijska korespondencija.¹⁵⁸

¹⁵⁶ Ibid. p. 89.

¹⁵⁷ Čarls, Dženks. *Moderni pokreti u arhitekturi*. Građ. Knjiga, Beograd, 1988. pp. 20-21.

¹⁵⁸ Kristijan, N. Šulc. *Egzistencija, prostor, arhitektura*. Građevinska knjiga, Beograd, 1975.

6.1.1. Nelinearna topološka arhitektonska forma

U arhitekturi kraja 20. stoljeća koja nakon postmodernog okretanja slikovnosti, historicizmu i simbolizmu, problematizira geometrijske okvire arhitektonske forme kroz dekonstrukciju klasičnih geometrijskih oblika, mogu se kao osnovne tendencije uočiti povratak kontekstualnim i ekološkim aspektima okoline kao faktorima determinacije forme, uz složenost i prepletenost, niveliranost i nelinearnost koji nadilaze klasične geometrijske okvire.

Višeslojnost se razvija kao temelj prostornog koncepta u tzv. "presavijenoj" (engl. folding) arhitekturi, gdje je arhitektonska forma definirana kao slojevita struktura. Prostorna forma je rezultat glatke, kontinuirane heterogene deformacije, omogućene fleksibilnošću topološke geometrije.¹⁵⁹ Ovakve forme korespondiraju prirodnim geološkim formama, nastalim kroz duže vremenske periode kao geološki slojevi, pa se često ovakve forme opisuju kao "geomorfne".

Forma postaje multilinearna, prepletena i zamršena mreža kontinuiranih deformacija, nesvodiva na jedinstvenu organizaciju, definirana lokalnim konekcijama bez fiksnih koordinatnih sistema, topološki otvorena prema vanjskim utjecajima. Kao odgovor na vanjski pritisak forma se ne lomi već uključuje i inkorporira vanjske sile, fleksibilna i responzivna, kao dinamički otvoreni sistem.¹⁶⁰

¹⁵⁹ Greg, Lynn. Architectural Curvilinearity; The folded, the pliant and the supple. *Architectural Design* 63: *Folding in Architecture*. Academy Editions, London, 1993, pp. 24-31

¹⁶⁰ Ibid. pp. 24-31.

Savijanje umjesto loma, kontinuitet umjesto fragmentacije i kontradiktornog odnosa formi karakterističnih za rani dekonstruktivizam i kontinuirane, "glatke" transformacije koje integrišu razlike heterogenih elemenata u kompleksne fleksibilne slojeve koji su međusobno prepleteni, imaju za cilj dinamičku adaptabilnost forme na eksterne uslove i utjecaje.¹⁶¹



*Slika 131.
Kontinuirane deformacije
topološke geometrije
rezultiraju kompleksnom
arhitektonskom formom.*

*Frank Gehry, Walt Disney
koncertni centar, Los Angeles,
2003.*

Novi pristup geometrijskoj konceptualizaciji i modeliranju u arhitekturi naglašava višeslojno preplitanje različitih prostornih koncepcija, modeliranje kroz višestruke modele i razrješavanje konfliktnih reprezentacija kroz diferencirane topologije. Iz prepletene mreže emergira forma kao rezultat komunikacije različitih modela u interakciji. Forma nije opisna ili reprezentirana već generirana, nije fiksna i statična već emergentna i dinamična, nije savršena i bezvremena već kompleksna i evolutivna.

¹⁶¹ Ibid. pp. 24-31.

6.2. KOMPLEKSNE PROSTORNO – VREMENSKE FORME U ARHITEKTURI

Pojmovi prostora i vremena u savremenoj nauci međusobno se nadopunjavaju i prožimaju. Tri osnovna značenja pojma vremena su vrijeme kao mjera kretanja, vrijeme kao ireverzibilna mjera entropije¹⁶² i vrijeme kao historija.¹⁶³

Pojam vremena povezan je u klasičnom smislu uz pojam kretanja, a kroz pojam kretanja sa geometrijom, s jedne strane kao dinamički geometrijski parametar i sa druge kao konstituenta četvrte dimenzije. Klasična fizika pojam vremena subordinira pojmu prostora, u kome materijalne čestice poštuju univerzalne zakone, nepromjenjive u odnosu na prošlost ili budućnost. Vrijeme klasične fizike je reverzibilno, služi kao eksterna mjera kretanja koje se odvija mehanički, ili kao statičan kontejner sukcesije prostornih promjena. Univerzalno mehaničko vrijeme teče ravnomjerno, mjereći događaje ne učestvujući u njima, ne utičući na promjene.¹⁶⁴

¹⁶² Princip entropije je jedan od fundamentalnih principa fizičkih zakona, u okviru termodinamike, označavajući pojmom entropije težnju fizičkih sistema prema stanju neuređenosti, što čini prirodne procese ireverzibilnim, odnosno usmjerenim ka jednom preferirajućem konačnom ravnotežnom stanju.

¹⁶³ Ilya, Prigogine. *From Being to Becoming; Time and complexity in physical sciences*. W. H. Freeman & Co. 1980. p. XII

¹⁶⁴ Ibid. pp. XI-XV

Apstraktno i linearno, beskonačno jednosmjerno definiran pojma vremena povezan je sa apstraktnim geometrijskim euklidskim prostorom. Geometrija kao apstraktan sistem ne uključuje vremensku dimenziju, njene strukture su konstituente absolutnog prostora i absolutnog vremena. Koncipirane u klasičnom geometrijskom modelu, arhitektonske forme egzistiraju naizgled bezvremeno, čvrste i nepomične, nepromjenjive i vječne. Primjenom klasičnog geometrijskog modela u arhitekturi stvaraju se bezvremene forme, koje obezbjeđuju stabilnost i čvrstoću oblika, nasuprot promjenjivosti prirodne okoline.

Klasičnom mehaničkom pojmu vremena kao linearne ekstenzije prostora ili odvojenog univerzalnog pozadinskog medija koji ne učestvuje u događajima, suprotstavljaju se nove tendencije u naučnim teorijama, koje vraćaju pojmu vremena značaj, stavljajući vrijeme u prvi plan, naglašavajući procesnu i relacionu kvalitetu svih fizičkih manifestacija.

Vrijeme postaje realna konstituenta svijeta a ne apstraktna odvojena kategorija, kao efektivni aspekt relacijske mreže koja determinira evolucijske procese nastajanja i geneze prostornih sistema. Naglašena je ne samo aktivna uloga vremena u definiranju fizičke realnosti, već i povezanost matematičkog svijeta koji je smatran bezvremenim, sa realnim svjetom.¹⁶⁵

Arhitektonski objekti ne egzistiraju u apstraktном, već u realnom, prirodnom prostoru u kome vremenski tok neumitno donosi neke promjene, koje utiču na materijalnu strukturu i formu objekta. Svaki arhitektonski objekt egzistira ne samo kao prostorna, već kao prostorno-vremenska struktura.

¹⁶⁵ Roberto, Mangabeira, Unger, Lee, Smolin. *The Singular Universe and the Reality of Time: A Proposal in Natural Philosophy*. Cambridge University Press , 2015. pp. 17-18.

Vremenski procesi, kao zbir svih prirodnih utjecaja koji djeluju na jedan objekt tokom njegove prostorno-vremenske egzistencije (klimatski, seizimički, društveni procesi...), nepovratno mijenjaju unutarnju mikrostrukturu, vizualnu formu objekta i njegove funkcionalne aspekte, čineći da objekt, poput živog organizma, stari. Svaki savršeno isplaniran objekt od strane čovjeka, idealne forme, glatkih, linearnih oblika, ma kako stabilan i statičan, od onog trenutka kada stupa u interakciju sa prirodnim silama, postaje izložen procesima koji donose nove, često neplanirane i nepredvidive promjene.

Pojam starenja označava slijed promjena neke prirodne strukture, koje se dešavaju uslijed vremenskog trajanja kao slijeda različitih procesa, definirajući ireverzibilno biološko vrijeme, bitno različito od mehaničkog vremena koje se uvodi tek u 17. stoljeću i koje ima univerzalan, linearan karakter. Vremenski procesi, kao slijed djelovanja prirodnih sila, načinju i razgrađuju idealnu geometrijsku strukturu materijalnih oblika, dodajući neplanirane detalje u vizuelnoj formi objekta, mijenjajući boje, teksture, konture; ravne ivice postaju nepravilne, glatke površine fragmentirane.

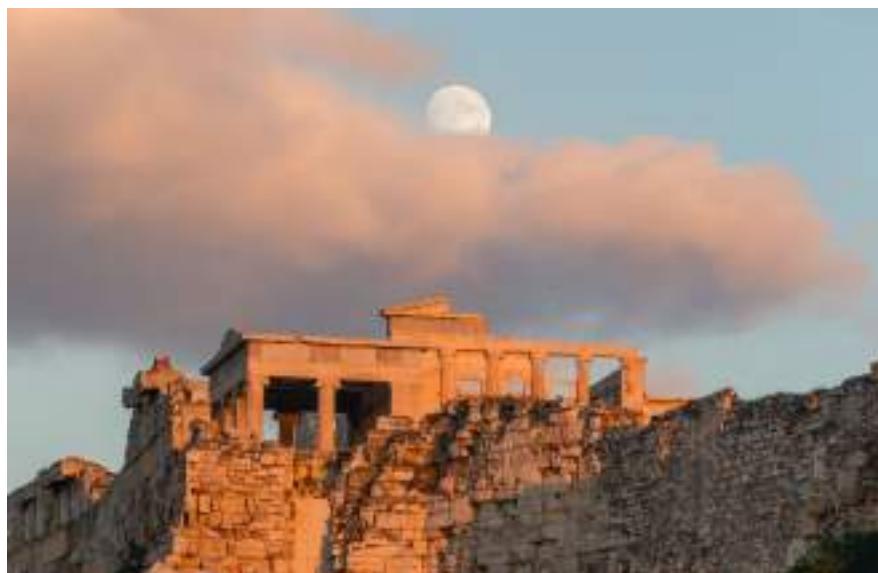
Prostorno-vremenska forma arhitektonskog objekta, obuhvatajući različite promjene, kao posljedice raznovrsnih spoljašnjih utjecaja kojima je izložen, ocrtava starost objekta kroz razvojnu dinamiku ireverzibilnog smjera. Prostorno-vremenska forma arhitektonskog objekta poprima karakter organske strukture, podložne rastu i propadanju, odnosno razgradnji.

"Veliki gradovi propadaju, postepeno se pokoravaju istoriji, uhvaćeni u organski koštac s prirodom, prepušteni utvarama, ili okrutno lišeni ukrasa, koje je sa njih strgao čovjekov nagon za pljačkom. Neki iščezavaju, a kod onih koji ostaju ruševine su često veličanstvenije i – mada to zvuči paradoksalno – ljudskije".¹⁶⁶

¹⁶⁶ Rose, Macauley. *Simfonije u kamenu*. Izdavački zavod Jugoslavija, Beograd, 1968. p. 5.

Svoju vizualnu ekspresiju prostorno-vremenska forma arhitektonskog objekta ima u vidu naprslina, pukotina, rasparčanih površina i razdrobljenih volumena, narušavajući pravilne forme proizašle iz apstraktnog geometrijskog prostornog modela. Idealna geometrijska struktura objekta dobiva kompleksan, dinamičniji karakter, kao prostorno-vremenska struktura.

Prihvatanje ili neprihvatanje promjena uzrokovanih nekontrolisanim, nepredvidivim vremenskim procesima, kao estetske komponente arhitektonske forme, odlika je različitih kulturnih perioda, pa u pojedinim razdobljima (npr. doba romantizma u 19. stoljeću) istaknuto mjesto u estetskoj teoriji dobiva "ljepota ruševina" pripisana ljudskoj estetskoj težnji za iracionalnim i nesavršenim.¹⁶⁷



*Slika 132.
Vizualna forma
fragmentirane strukture
antičke arhitekture
izložene vremenskim
procesima.*

*Hram Erechteion,
Akropola, Atena,
V st. p.n.e.*

¹⁶⁷ Đilo, Dorfles. *Pohvala Disharmoniji*. Svetovi, Novi Sad, 1991.

Nasuprot modernoj arhitekturi, mnogi antikni ili srednjovjekovni objekti, djelomično fragmentirane i razgrađene forme, pružaju estetsko zadovoljstvo i utisak skladne celine. Dimenzija vremena ocrtana u ruševinama, ukazuje na estetske kvalitete koje uključuju i vremensku dimenziju u vizualnu strukturu neke forme.

Prostorne arhitektonske forme izložene različitim nepredvidivim vremenskim procesima postupno gube vizualnu jasnoću i čistoću geometrijskog oblika, da bi se nakon veće vremenske distance uklopile u iregularne forme prirodne okoline. Vizualna korelacija arhitektonskih objekata velike starosti i prirodnih oblika, ukazuje na korespondentne strukturne principe dinamičkih formativnih procesa koji oblikuju prostorne forme kroz vrijeme. Planiranje prostornih arhitektonskih struktura isključivo u statičnom geometrijskom modelu, rezultira formama koje se neminovno sukobljavaju sa dinamikom vremena.

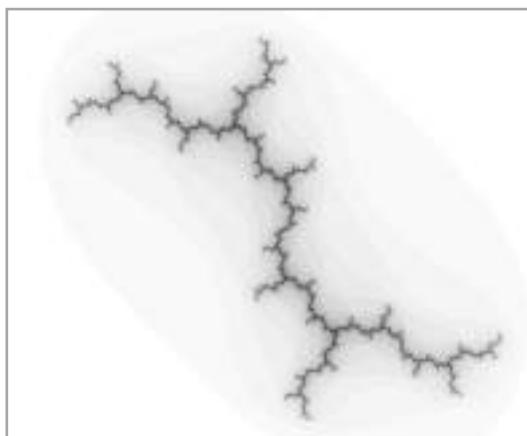
6. 2. 1. Vremenski procesi i prirodni algoritmi transformacije forme

Dinamički karakter prostorno-vremenskih struktura u arhitekturi ukazuje na određenu geometrijsku determiniranost i onih formi koje je moderna civilizacija odbacila kao estetski neprihvatljive za planiranu, geometrijski determiniranu gradnju prostornih formi u arhitekturi: formi nastalih starenjem objekta kao što su pukotine, naprsline, različite mrlje i nanosi prljavštine, hrđe ili mahovine...

Moguće je utvrditi strukturnu i vizualnu korelaciju između fraktalnih geometrijskih formi i formi nastalih pod djelovanjem različitih vremenskih činioča, koje se pojavljuju na starim arhitektonskim objektima prepuštenima djelovanju sila prirode kroz duži vremenski period.

Ova korelacija rezultat je istovrsnih fizičkih procesa koji učestvuju u oblikovanju prirodnih formi i razgradnji vještačkih formi – arhitektonskih objekata. Istovrsne sile koje djeluju na više nivoa istovremeno ili na jednom nivou kroz različite vremenske periode, predstavljaju prirodne algoritme kojima su determinirane strukturne transformacije ponavljujućeg karaktera koje rezultiraju formama koje su analogne fraktalnim geometrijskim formama.

Međusobni utjecaji različitih sila i procesa rezultiraju velikim stupnjem varijacija. Zato su geometrijska "nepravilnost" i kompleksnost osnovne vizualne karakteristike formi nastalih pod djelovanjem prirodnih sila kroz duže vremenske periode, pa su i forme koje u arhitekturi nastaju "starenjem" objekata vizualno kompleksne, nepravilne i nesumjerljive.



*Slika 133.
Izomorfnost prostorno-vremenskih i fraktalnih geometrijskih struktura.
Antičke ruševine u dolini hramova, Agrigente.
Julijev fraktal.*

Nauka 20. stoljeća zamjenjuje prostor i vrijeme kao invarijantnu pozadinu fizičkih procesa, dinamičkom relacionom prostorno-vremenskom koncepcijom. Ne samo prostor i vrijeme već i zakonitosti fizičkih procesa postaju historijski definirani i evolutivni.¹⁶⁸ Kompleksniji geometrijski modeli koji uključuju procesnu dinamiku višestrukih transformacija, obuhvataju vremenske procese koji se izražavaju kroz višestruke strukturne materijalne transformacije forme.

Uloga vremena kao dinamičkog faktora u oblikovanju arhitektonskih prostornih formi, ne znači samo otpor degradaciji, kroz stabilne i savršene geometrijske oblike, već integrisanje vremenske dimenzije u prostor, kao dinamičkog faktora koji prostor čini živim egzistencijalnim prostorom a ne kontejnerom statičnih objekata.

Vrijeme vraćeno u arhitektonsku formu postaje integralni aspekt prostornosti, uključujući složene multiplicirane transformacije kao unutarnji dinamički potencijal forme. Kroz fizički arhitektonski objekt apstraktни entiteti, kao što su ne samo geometrija, već društvo i kultura, postaju konstituirani u prostoru i vremenu i projektovani u budućnost.¹⁶⁹

Novi geometrijski modeli koji uključuju kompleksne dinamičke procese postaju alati kojima se arhitektura dinamizira na način koji omogućava stvaranje istinski novoga prostornog izraza kao vremenske determinante koja odvaja prošlost od budućnosti.

¹⁶⁸ Roberto, Mangabeira, Unger. Lee, Smolin. *The Singular Universe and the Reality of Time : A Proposal in Natural Philosophy*. 2015. p. XI

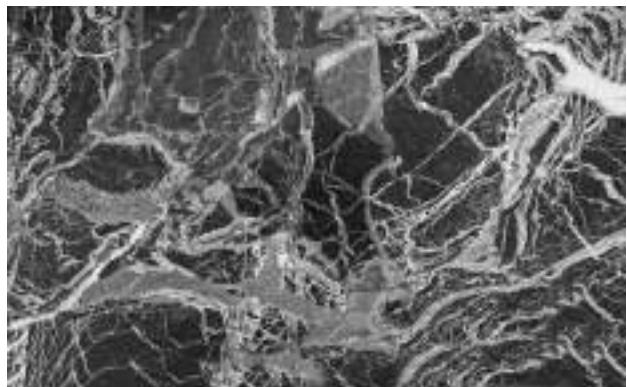
¹⁶⁹ Bill, Hillier. *Space is the Machine: A configurational theory of architecture*. Space Syntax, London, 2007. p. 301.

6.3. PROSTORNE ARHITEKTONSKE FORME NA RUBU HAOSA

Haos je pojam koji se vezuje uz neuređena, nepredvidiva ili slučajna stanja i pojave. Potreba ljudskog razuma da u svijetu oko sebe pronalazi i utvrđuje red, pravilnost, uređenost i predvidivost, oduvijek se suprotstavljala prirodnim silama koje su djelovale naizgled nepredvidivo ili haotično. Nauka je tražila i utvrđivala pravilnost u prirodnim pojavama, smanjujući neodređenost i nepredvidivost sve većem opsegu pojava i procesa. Pojam haotičnog time je obuhvatao sve manje područje fizičkih pojava. Teorija haosa i fraktalna geometrija uvode nove poglede na sam pojam haosa, definirajući pojam determinističkog haosa, koji iako zadržava oblike nepredvidivosti, ipak pokazuje zakonitost određenih pravilnosti.

Pravilnost i uređenost u prostornom smislu, rezultat su geometrijske determiniranosti prostornih struktura. Svaku prostornu formu definiranu u geometrijskom prostornom modelu i svaku kompoziciju strukturnih elemenata koja zadovoljava geometrijske zakonitosti, a posebno zakone simetrije, smatramo uređenim. Haotične prostorne strukture, nasuprot tome, bile bi sve one forme koje ne možemo obuhvatiti geometrijskim modelima i sve kompozicije prostornih elemenata koje se ne mogu izraziti pravilima uređenosti. Prostorne forme koje nije bilo moguće obuhvatiti klasičnim geometrijskim modelom, tretirane su kao nepravilne, nasumične, i kao takve nisu mogle biti planirane, osmišljene i realizirane kao geometrijski determinirane forme.

Prostorne forme smatrane proizvoljnim, haotičnim i potpuno geometrijski neuređenim, koje imaju određenu ulogu u kreiranju arhitektonskog prostora, su sve vrste organskih prirodnih tekstura različitih gradivnih materijala, kao što su trska, drvo, kamen, ... One imaju značajnu ulogu u vizuelnoj strukturi arhitektonske forme, bilo cjelovite građevine ili enterijera i detalja. Teksture površina od prirodnih materijala u arhitekturi djelomično su produkt prirodnih procesa, a djelomično ljudske dorade ili obrade osnovnog materijala. Teksture prirodnih materijala posljedica su djelovanja prirodnih sila kroz duže vremenske periode, kao rezultat kompleksne prirodne dinamike. Izbor određenih materijala u arhitekturi, često je uslovljen i vizuelnim estetskim dojmovima određene teksture, kombiniranjem nepravilnih, slučajnih uzoraka sa pravilnim geometrijskim formama.



Sl. 134.

Uloga prirodnih haotičnih tekstura u formiranju arhitektonskog prostora.

*Ludwig Mies van der Rohe, Barcelona paviljon,
Internacionalna izložba, 1929.*

6.3.1. Samoorganizacija i nedeterminirane urbane forme

U geometrijski nedeterminirane arhitektonске forme, smatrane haotičnim i neuređenim, spadaju i urbanističke strukture, većinom nastale neplanskim izgradnjom. Vizure neplanski građenih naseobina kao što su ruralna naselja ili srednjovjekovni gradovi, utapaju sa veće distance u teksturu prirodne okoline, kao dio pejzaža. Ovakve prostorne strukture nastaju kao rezultat kombinacije različitih prirodnih, konstruktivnih, socijalnih i drugih faktora, što rezultira kompleksnom generalnom strukturu, a njihova prostorna forma može se nazvati haotičnom i neuređenom u klasičnom geometrijskom smislu.

"Haotičnost" prostornih arhitektonskih urbanih struktura ne mora značiti totalnu proizvoljnost i neuređenost, već može biti proizvod kompleksnosti višestrukog djelovanja determiniranih procesa na različitim prostornim i vremenskim nivoima. Složeni urbani prostorni obrasci većine tradicionalnih i historijskih naselja rezultat su procesa samoorganizacije, koji proizvodi kompleksne strukture bez formalnog generalnog plana i reda nametnutog odozgo. Rast ovakvih naselja odražava samoorganizovane procese na različitim funkcionalnim, ekonomskim i fizičkim podnivoima i skalamama, u međusobnoj međuzavisnosti prirodnog i ljudskog života.

Proces samoorganizacije karakterističan je za mnoge fizičke i organske pojave. Međusobna povezanost samoorganizirajućih sistema, odražava se na mnogim nivoima, uključujući sistemsku povezanost sa okolinom. Prostorne forme nastale samoorganizacijom mogu posjedovati određenu pravilnost, determiniranu geometrijom kompleksnih sistema i principima samosličnosti.

Vizualno korespondentne nekim prirodnim formama, fraktalne geometrijske strukture mogu pokazati određenu vizualnu i strukturnu korelaciju i sa nedeterminiranim urbanim arhitektonskim prostornim formama. Ova korelacija odnosi se na samosličnost, vizualnu morfološku kompleksnost i nesumjerljivost kao fraktalnu dimenziju.¹⁷⁰

Kompleksna dinamika nelinearnih heterogenih prostornih urbanih sistema uključuje i aktivnosti lokalnog stanovništva, vodeći ka sinergiji iz koje kroz dinamičke fluktuacije i prostorno-vremenske promjene emergira i evolvira jedinstveno mjesto, koje ima svoj prostorni identitet.¹⁷¹ Generator formiranja prostora su pojedinačne akcije, vođene lokalnim uslovima i naslijedenim jednostavnim graditeljskim pravilima. Manje skale pojedinačnih prostornih intervencija proizvode veće skale kolektivnih naselja, povezane sa prirodnim okruženjem. Jednostavnost osnovnog reda prenosi se kroz mnoge prostorne i vremenske nivoje i skale, što rezultira složenim, nelinearnim i nestabilnim redom.

Određena vizualna neuređenost i haotična organizacija kompleksnih urbanih prostornih sistema je rezultat utjecaja višestrukih faktora i procesa, čija interferencija rezultira nelinearnim, kompleksnim generalnim formama. Prostorni diskontinuiteti, heterogenost i kompleksnost, reflektuju takvu urbanu organizaciju prostora koja obuhvata i nepredviđene utjecaje kroz nove koncepte prostora bazirane na kompleksnijim geometrijskim modelima. Teorija grada kao kompleksnog sistema, grad posmatra kao otvoreni, kompleksni, i često kaotičan kolektivni i artificijelni sistem, koji nije samo fizička materijalna okolina njegovih stanovnika već i medij njihove interakcije.¹⁷²

¹⁷⁰ Michael, Batty, Paul, Longley. *Fractal Cities: A Geometry of Form and Function*. Academic Press, London. 1994. p. 97.

¹⁷¹ Peter, M. Allen. *Cities: The Visible Expression of Co-evolving Complexity*. In Ekim, T. Egbert, S. Han, M. & Juval, P. *Complexity Theories of Cities Have Come of Age*, Springer, Heidelberg, 2012. pp. 67-89.

¹⁷² Ibid.



Slika 135.
Kompleksna struktura urbanih
prostornih formi.
Mapa ulica grada Rima.

Kompleksnost se sve više smatra osnovnom prepostavkom dinamičkih procesa, ne samo organskih već i informacijskih. Različiti dinamički informacijski modeli koji modeliraju dinamičke razvojne procese a ne samo finalne statične forme, postaju inkorporirani u urbano planiranje i organizaciju prostora kao kompleksnog dinamičkog sistema. Fraktalna geometrija, celularni informacijski sistemi i sistemi dinamičkih interaktivnih "agenata", postaju modeli koji omogućavaju reprezentaciju, simulaciju i anticipaciju emergentnog razvoja urbanističkih struktura.¹⁷³

Modeli bazirani na jednostavnim elementima kao simulacijski modeli određenih dinamičkih procesa, ipak ne mogu obuhvatiti ili predvidjeti sve urbane fenomene koji nisu kvantitativni, a posebno se ističe problematika preklapanja i modeliranja procesa na različitim prostornim i vremenskim skalamama.¹⁷⁴

¹⁷³ Michael, Batty. Cities and Complexity: Understanding Cities through Cellular Automata, Agent-Based Models, and Fractals. MIT Press, Cambridge, 2005.

¹⁷⁴ Juval, Portugali. Complexity, Cognition and the City, Springer, Berlin, 2011. pp. 66, 134-135.

Portugali povezuje kompleksnost, spoznaju, planiranje i dizajn prostornih sistema u interaktivnu cjelinu, dajući prednost individualiziranim akcijama, interakcijama i očekivanjima i anticipacijama stanovnika. Naglašena je uloga aktivnih stanovnika grada čija interakcija zajedno sa materijalnim dijelovima urbanih sistema i okolinom producira kompleksnu okolinu koja povratno djeluje na stanovnike i njihovo ponašanje. Stanovnici grada kao aktivni dinamički "agenti" djeluju u urbanim procesima internim procesima "odozdo na gore", utičući na urbani razvoj u značajnijoj mjeri u odnosu na prostorne planere koji djeluju eksternim intervencijama.¹⁷⁵

Uz pojam haosa najčešće se vežu negativne konotacije, a arhitektura simbolizira civilizacijska dostignuća u stvaranju uređene i stabilne okoline. Arhitektura i socijalne strukture ljudskog društva ipak su dio svijeta koji je kompleksan, a definicija kompleksnih sistema podrazumijeva sisteme na rubu haosa i reda. Pojava haosa u teoriji kompleksnih sistema ne nosi potpuno negativne posljedice, jer se na njegovom rubu dešavaju najdinamičniji životni procesi. "Rub haosa je konstantno promjenjiva konfliktna zona između stagnacije i anarhije, mjesto na kome kompleksni sistemi mogu biti spontani, adaptabilni i živi."¹⁷⁶

Potencijal kompleksnih sistema u smislu adaptabilnosti, stabilnosti uprkos promjenama u vidu transformabilnosti, uz održanje identiteta i jedinstvenosti, postaje sve više značajan u planiranju arhitektonskog prostora.

¹⁷⁵ Juval, Portugali. What makes cities complex? Complexity, Cognition, Urban Planning And Design. Springer. 2014. pp. 3-19.

¹⁷⁶ Mitchell, M. Waldrop. Complexity, The Emerging Science at the Edge of Order and Chaos. 1993. p.12.

6.4. DIGITALNA ARHITEKTURA

Nove metode reprezentacije, modeliranja i konceptualizacije prostora proizašle iz razvoja novih područja u oblasti informatičke tehnologije, ulaze i u domene arhitekture. Uvid u različite aspekte i mogućnosti novih informacijskih modela u arhitekturi donosi suštinski nove prostorne koncepte. Pojmovi kao što su „virtualna“ ili „digitalna arhitektura“, povezuju se uz mogućnosti koje pruža računarska tehnologija u oblasti arhitektonskog projektovanja, ne samo na području grafičke obrade i vizualizacije projekta, već i u smislu uvođenja novog medija, koji otvara šire mogućnosti prostornog modeliranja i njegove konceptualizacije.

Neke nove teme kao što su teorija haosa i fraktalna geometrija, evolutivni i generativni dizajn, parametarsko modeliranje ..., samo su neki od pojmove koji su ušli i u oblast arhitekture kao rezultat primjene informacijske tehnologije i novih mogućnosti prostornog modeliranja i vizualizacije.

Nove prostorne teorije u arhitekturu su krajem 20. stoljeća ušle kroz dekonstruktivizam kao filozofski pravac koji razgrađuje ustaljene norme preispitujući fundamentalne obrasce ustrojenosti kreirane stvarnosti. U arhitekturi se pokret dekonstruktivizma odražava kao dekompozicija, deformacija i destabilizacija forme, odnosno kao nadilaženje klasičnih geometrijskih zakona njenog idealističkog ustrojstva naglašenih u modernizmu.

6.4.1. Dekonstrukcija klasične geometrijske forme u digitalnom prostoru

Modernistička ortogonalnost, čistoća geometrije i stabilnost vizualne forme, dinamizirana je u dekonstruktivističkoj arhitekturi otklonom vertikala, deformacijom pravog ugla, destrukcijom perspektive, nabiranjem ili razlivanjem forme, potpomognutim novim medijem računarske grafike i modeliranja.

Dekonstruktivizam u arhitekturu umjesto jedinstva, harmonije i stabilnosti donosi destabilizaciju, imperfekciju i distorziju, ne kao eksternu destrukciju forme već kao njeni unutarnji strukturni svojstvo.¹⁷⁷ Dekonstruktivistička forma ne negira geometriju već emergira iz poznate geometrije kroz njene nepoznate, neistražene unutarnje strukturne transformacije.

Dinamizirana arhitektonska forma digitalnog informacijskog doba, sa okružujućim prostorom ubrzanog, haotičnog urbanog ritma, nalazi teoretsku podlogu u novim teorijama: fizikalnoj teoriji haosa i teoriji kompleksnih sistema, te područjima savremene geometrije kao što su topologija ili fraktalna geometrija. Nabrane, izvijene i presavijene forme Franka Gehrya, fluidna, anamorfna arhitektura Zahre Hadid, razlomljena, konveksna prostorna kompozicija Daniela Libeskinda, višestruko transponovane i multiplicirane forme Petera Eisenmana, kao najekspresionistički primjeri arhitekture kraja 20. i početka 21. stoljeća, nadilaze klasične prostorne koncepte i njihove geometrijske okvire, prelazeći u nove domene tzv. "digitalne arhitekture" bazirane na računarskom modeliranju i reprezentaciji forme.

¹⁷⁷ Philip, Johnson, Mark, Wigley. *Deconstructivist architecture*. The Museum of Modern Art, New York, 1988. p. 11.

Geometrijski model prostora povezan je uz konvencije grafičke reprezentacije, dajući formalne okvire opisu mentalnih prostornih koncepata, konkretizirajući vizualne informacije. Oblici arhitektonske forme nastali su i kao nužnost određenih načina reprezentacije i kodifikacije arhitektonskog projekta, baziranih na geometrijskoj prostornoj determinaciji. Ograničenja geometrijskog prostornog modela postala su i ograničenja potencijala formi koje mogu biti izgrađene. Limiti nacrtu i mjere postali su i limiti gradnje.¹⁷⁸

Omogućivši brzu i jednostavnu grafičku prezentaciju geometrijskih operacija kao što su: uvećanje, umanjenje, multipliciranje, parametarska modulacija, višestruke transformacije, fazne serijacije transformacija i variranje transformacionih parametara, računarska tehnika i grafika doprinose promjeni u pristupu prostornoj determinaciji i modeliranju. Novim tehnikama geometrijskog modeliranja otvaraju se i širi okviri geometrije nadilazeći neke limite konvencionalnih načina arhitektonske reprezentacije, time omogućavajući i gradnju kompleksnijih formi.

Otkrivajući geometriju baziranu na osnovama nove topologije prostora, „digitalizacija“ arhitektonske forme uz vektorsku grafiku, dala je morfološku podlogu produciranju dinamičkih transformabilnih multivarijantnih formi koje nastaju kao produkt softverskih manipulacija i geometrijskih transformacija. Koristeći mogućnosti veoma varijabilnih, transformabilnih rješenja koje omogućava primjena računarskog modeliranja, u arhitekturi se pojavljuju tzv. „slobodne forme“ (engl. free form), oslobođene ograničenja ručno reprezentirane klasične geometrije i standardne tehničke reprezentacije.

¹⁷⁸ Mario, Carpo. *The Alphabet and Algorithm*. MIT Press, 2011. p. 31.



Slika 136.

Geometrija digitalizirane arhitektonske forme:

Coop Himmelb(l)au:

Musée des Confluences, Lyon, Francuska, 2014.

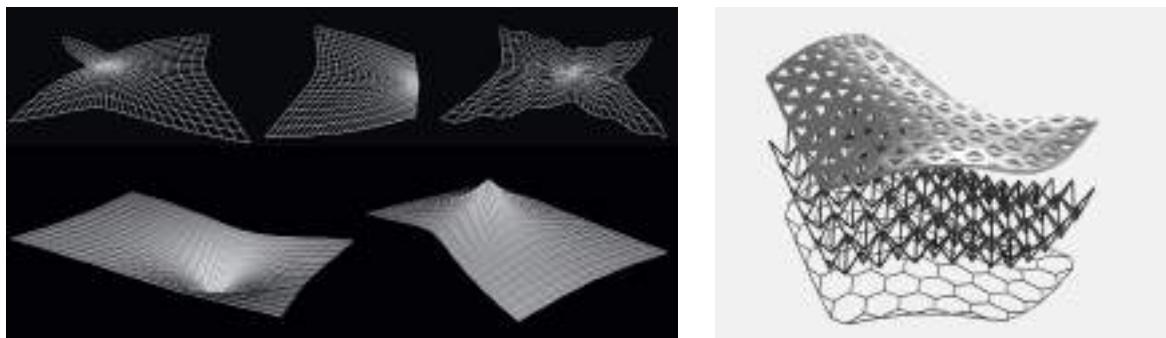
Paneum, muzej i izložbeni centar, Asten, Austrija, 2017.

Različite kombinacije digitalnih modifikatora omogućavaju interaktivnu manipulaciju kompleksnih geometrijskih formi. Umjesto fiksnim staticnim geometrijskim oblicima, arhitektonska forma postaje definirana kroz nelinearnu umreženu povezanost.

Informacijsko doba u arhitekturu uvodi nove generativne tehnike. Digitalna morfogeneza kao proces stvaranja i transformacije forme bazirana na kompjutacijskim procesima, vezana je za koncepte topološkog prostora, izomorfnih površina, animiranih, metamorfnih i parametarskih oblika koji nisu determinirani euklidskom geometrijom, posjedujući visok nivo nepredvidivosti i neodređenosti.¹⁷⁹

¹⁷⁹ Branko, Kolarevic. ed. *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*. Spon Press, New York, 2003. pp.17- 42.

Ekspanzija "digitalne arhitekture" u svojoj uzlaznoj fazi radikalne digitalizacije odbacuje ustaljene geometrijske kodove, oslobođajući prostornu arhitektonsku formu od ograničenja linearnosti, vertikalnosti i ortogonalnosti. Fragmentirana, zakriviljena dvodimenzionalnost iz koje je izronila "digitalna arhitektura" oslanjajući se na umrežene, triangulirane, savijene, "blob" i NURBS površine¹⁸⁰, nema potrebu za klasičnim sistemom diferenciranja prostornih dimenzija. Prostor digitalne arhitekture je animiran poljima i gradijentima, kroz mrežne tokove koji integrišu prirodne i artificijelne sisteme, problematizirajući i brišući njihove jasne granice.



Slika 137.

Savijanje, deformacija i mrežna determinacija kao karakteristike "digitalne" arhitektonske forme

¹⁸⁰ "Blob" objekti se međusobno mogu odbijati ili privlačiti, ovisno o njihovoj relativnoj blizini putem simuliranih gravitacijskih polja, definirajući dinamične izomorfne polipovršine. Rezultirajuća složena geometrija površine određuje se računanjem kontura. - definicija iz Schumacher, Patrik. The Progress of Geometry as Design Resource. Log, 2018, Issue on Geometry, London, 2018.

NURBS je skraćenica za neuniformne racionalne B-spline linije i površine (engl. Non-uniform rational B-spline) kao način matematičkog modeliranja u računarskoj grafici pomoću kontrolnih tačaka.

”Digitalna arhitektura” nastaje u prostoru između digitalnog, diskretnog¹⁸¹ karaktera kompjutacijskog medija i kontinuiranih transformacija i glatkih tranzicija iz kojih emergiraju forme koje ne mogu biti reducirane na kodove iz kojih su izvedene. Prostorna forma u ”digitalnoj arhitekturi” emergira ne kao fiksna konfiguracija već kao moment prostorno-temporalnog toka dinamičke geometrije. Forma nije apstraktna struktura idealnog svijeta, već je njena realnost neodvojiva od informacijskih i fizičkih procesa kojim je producirana.¹⁸²



Slika 138.

Prostorna forma kao produkt informacijskih i fizičkih procesa:
Kompleksne forme parametarskih kompjutacijskih procesa;
Saucier + Perrotte: Perimeter institut za teoretsku fiziku, Waterloo, Kanada, 2006.

¹⁸¹ Pojam diskretnog u matematskom smislu označava odijeljen, odvojen, zaseban i pojedinačan karakter vrijednosti, u informacijskim naukama vezan uz pojam digitalnog sistema kao sistema odvojenih jedinica ograničenih vrijednosti koje nisu kontinuirane.

¹⁸² Antoine, Picon. Continuity, complexity and emergence: what is the real for digital designers? Perspecta no. 42. 2010. pp. 147-157.

6.4.2. Geometrija i topologija forme od digitalnog do postdigitalnog doba

“Digitalni dizajn” postaje novi, jedinstven metodološki i konceptualni način projektovanja, otvarajući mogućnosti primjene kompleksnih topoloških modela, integrišući u jedinstveno informacijsko područje procese reprezentacije i generiranja forme, uz kontinuiranu evaluaciju kroz interaktivne dinamičke procese. Evaluacija projekta nije fokusirana samo na reprezentaciju forme, već može obuhvatati i interaktivan pristup u digitalnu informacijsku okolinu koja generira reprezentaciju.¹⁸³

Umjesto modeliranja eksterne forme definira se unutarnja generativna logika iz koje automatizirano proizilaze varijabilne mogućnosti od kojih se na osnovu određenih kriterija bira formalno rješenje.¹⁸⁴ Digitalni dizajn s jedne strane vodi ka većoj kontroli reprezentacije, formalnom determinizmu i numeričkoj preciznosti opisa, a s druge strane oslobođa formu determinističke kontrole kroz dinamičku transformabilnost generativnih procesa koji leže u kompjutacijskim podnivoima, što može rezultirati nedeterminiranim, varijabilnim rješenjima.

Od nedeterminiranog informacijskog polja varijabilnih formi kroz projektnu skicu, arhitektonski projekt prelazi u permanentnu formu koja postaje stabilna i fiksna još u idejnoj fazi projekta, da bi iz precizno metrički determiniranog izvedbenog projekta bila u posljednjoj fazi materijalizirana.

¹⁸³ Rivka, Oxman. Theory and design in the first digital age. *Design Studies* 27. Elsevier, 2005. pp. 229- 265.

¹⁸⁴ Branko, Kolarevic. *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*. 2004. p. 17.

Digitalna tehnologija uvodi još jedan novi posredni nivo između ideje i materijalnog objekta, prevodeći geometriju forme u kodove i algoritme numeričkih podataka posredovane preko jezika korisničkog interfejsa. S druge strane geometriju, koja je bila okvir konačne finalne zatvorene strukture projekta, digitalno informacijsko modeliranje integrira sa druge dvije bitne faze arhitektonske kreacije koje su izgledale oslobođene apstraktnih geometrijskih struktorno determiniranih domena - faze idejne skice i materijalne fizičke gradnje.

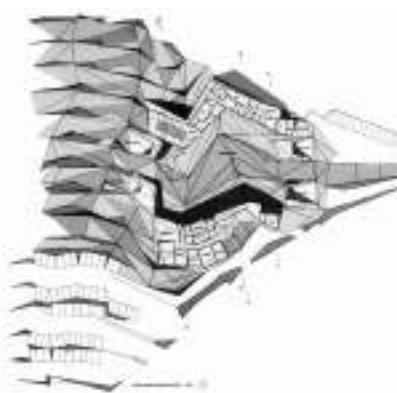
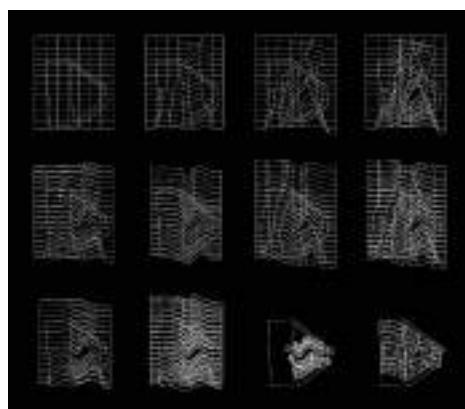
Projektna skica je u "analognom" pristupu bila topološka, otvorena i dinamična, a geometrija izvedbene projektne forme euklidska, zatvorena i statična. Digitalizirana i informacijski modelirana geometrija postaje topološka, otvorena i interaktivna - dobiva osobine skice.

Istovremeno preko informacijskog modeliranja koje je direktno povezano sa novim tehnikama digitalizirane materijalizacije (3d print, CAD/CAM tehnologija), apstraktna forma direktno je vezana za materijalizaciju i gradnju.

Digitalizirana prostorna forma postaje dinamična, transformabilna, varijabilna i interaktivna u informacijskom topološki generiranom prostoru. Pojam dinamike koji u klasičnoj mehanici znači kretanje objekta kroz neutralan homogeni prostor, kao promjenu pozicije, ocrtava se u kartezijanskoj geometriji prostornih koordinata tačke. Topološki prostor više nije neutralan i homogen, već posjeduje svojstvo različite zakrivljenosti koja utiče na geometriju kretanja. Ne može se više govoriti o kretanju kroz neutralni prostor jer kretanje postaje kvalitet koji nadilazi linearne mehanički determinirane sisteme, pretvarajući se u transformabilna polja međusobnih relacija koje su uzajamno koordinirane.

Kompleksni projektni informacijski prostor postaje mnogostruki višedimenzionalni prostor mogućih stanja u kome su modelirane trajektorije dinamičkih procesa, zamjenjujući kompleksnost promjene stanja objekta kompleksnošću modeliranog prostora.¹⁸⁵

Forma kompleksnog prostora nije definirana metričkim svojstvima već morfogenetskim procesima transformacije i loma simetrije. Ovi procesi uključuju vremensku dimenziju dajući formi evolutivni karakter. Prostor je oslobođen fiksnih referentnih okvira, kao diferencijalno područje samo-referentnih podprostora. Umreženost, kontinuitet i konektivnost postaju odrednice forme. Različiti dinamički procesi modeliranja forme zasnovani su na topološkim, asocijativnim i vremenski baziranim tehnikama modeliranja koje imaju potencijal generiranja multiplikiranih instanci u dinamičkom kontinuumu.¹⁸⁶



Slika 139.

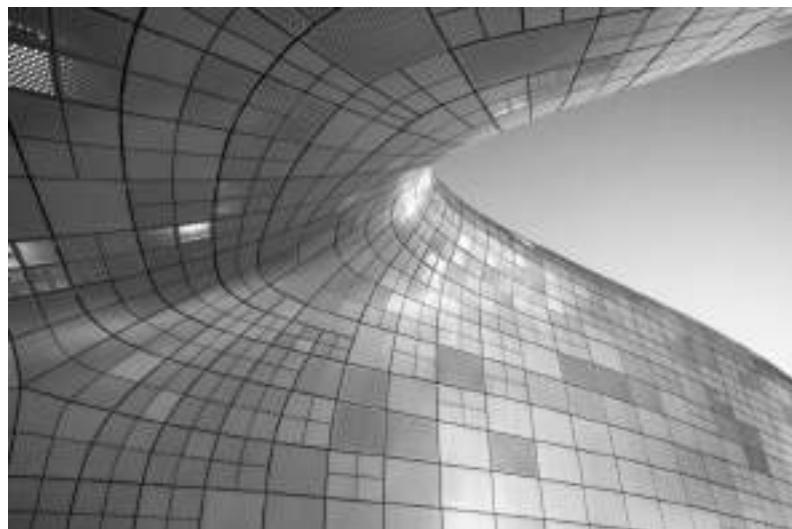
Otvorena topološka digitalizirana forma
Peter Eisenman, projekt crkve 2000, 1996.

¹⁸⁵ Manuel, Da Landa. Intensive Science and Virtual Philosophy. 2002. p. 14.

¹⁸⁶ Rivka, Oxman. Theory and design in the first digital age. 2005. pp. 229- 265.

Umjesto statičnog mrežno organiziranog homogenog prostora u kome se odvija klasična mehanika apstrahovana kartezijanskim koordinatama, struktura prostorne mreže se dinamizira i razvija. Topologija mreže kao njen geometrijsko svojstvo koje ne može biti obuhvaćeno euklidskom metričkom geometrijom, ne ovisi o skalama veličina. Topologija mreže formirana je i ovisna o različitim parametrima i pravilima dinamičkog razvoja, koji mogu biti definirani kao algoritamska pravila.

Većina kompleksnih dinamičkih sistema predstavlja razvojne topološke sisteme, gdje su uzajamno povezani topologija i dinamika mreže u evolutivnom razvoju kao koevolutivno adaptabilne mreže.¹⁸⁷



Slika 140.
Arhitektonska forma definirana
kroz nelinearnu umreženu
strukturu.

Zaha Hadid: Dongdaemun Design
Plaza, Seoul, 2014.

¹⁸⁷ Bernd, Blasius. Thilo, Gross. Dynamic and Topological Interplay in Adaptive Networks. u ed. Schuster, Heinz, Georg. *Reviews of Nonlinear Dynamics and Complexity*. vol. 2, Wiley-VCH, Verlag, 2009. pp. 63-106.

Pojam "digitalne arhitekture" i problematika informacijskog modeliranja kompleksne stvarnosti ulazi u tzv. "postdigitalno doba". Pojam postdigitalnog doba obuhvata različite tendencije povezane s promjenom razumijevanja i otkrivanja posljedica informacijske tehnologije i njene hibridne integracije sa materijalnim svjetom.

Digitalna predstava fizičkog materijalnog svijeta kao idealizirana reprezentacija, dovodi digitalizirani oblik do savršenstva, bez nepravilnosti, nesavršenosti materijalnog svijeta, povezujući digitalizaciju sa geometrijskom idealizacijom. Postdigitalni povratak materiji ne znači povratak klasičnom determinističkom pogledu na materiju, već ispituje materiju i strukturu materijalnih objekata kao informacijsku matricu kompleksnog karaktera. "Novi materijalizam" oslobađa materiju od mehaničkog determinizma, umjesto racionalno predvidivog ponašanja, materija postaje složena, dinamična, samoorganizirana, nepredvidiva.¹⁸⁸ Iz teorije kompleksnosti izvire i novi pogled na materiju, koja više nije amorfna pasivna masa, već je hijerarhijski strukturirana, inteligentna, adaptabilna prema okolini.¹⁸⁹ Novi materijalizam time i geometriju vraća iz apstraktnog u materijalni svijet, dajući joj konkretnu realnost i materijalnost.

S druge strane u digitalnom prostoru materija postaje prevedena u isti jezik kao i geometrija - jezik kompjutacijskog koda. Kompjutacijski kod se smatra nematerijalnim, pripadajući s jedne strane domenu jezika kao virtualne dinamičke mape svijeta. Postdigitalno doba u kome se preispituju neke osnovne postavke kompjutacijskog formalizma, redefinira pojmove analognog i digitalnog, ulazeći u problematiku odnosa forme i materije, modela i objekta.

¹⁸⁸ Geoff, Pfeifer. *The New Materialism: Althusser, Badiou, and Žižek*. Routledge, New York, 2015. p. 6.

¹⁸⁹ Jane, Bennett. *Vibrant Matter: a Political Ecology of Things*. Duke University Press, Durham and London, 2010. p. vii- viii, 7-13.

6.5. INFORMACIJSKO MODELIRANJE KOMPLEKSNE ARHITEKTONSKE FORME

Ubrzani tehnološki razvoj informacijske tehnologije na određen način nadilazi razvoj metodologije arhitektonskog projektovanja, koja se traži u novim digitalnim metodama i modelima. Vezano za savremene digitalne alate, standardno tehničko grafičko i geometrijsko modeliranje prostora transformira se u informacijske modele, dobivajući generativne i formativne kvalitete koje nadilaze klasične reprezentacijske prostorne okvire i njihov opisni karakter.

Projektovanje u tehničkim disciplinama zahtijeva razumijevanje i praktično ovladavanje veoma kompleksnim područjem, sa različitim prostornih, funkcionalnih, strukturalnih, materijalnih, ekonomskih i socijalnih, te kulturnih i estetskih aspekata. Proces projektovanja zasniva se na formiraju posrednih mentalnih, grafičkih i materijaliziranih modela, na različitim nivoima apstrakcije, koji služe za konceptualizaciju i vizualizaciju, analizu i prezentaciju različitih aspekata projekta. Prostorno modeliranje bazirano na geometrijskim osnovama u informatičkom dobu uz pomoć računarske tehnologije postaje integrисано са različitim analitičkim i produksijskim modelima, stvarajući informacijske modele koji nisu samo prostorni već obuhvataju i druge bitne aspekte projekta. Osnova ovakvih informacijskih modela je 3D geometrijski objekt, koji kroz različite dodatne informacijske modele dobiva nove dimenzije i semantička značenja.

Arhitektonsko oblikovanje prostorne forme prolazi kroz dvije faze. U prvoj – projektnoj fazi, forma je kreirana prvenstveno kao informacijski sadržaj, a njena materijalna sadržina reducirana je na kvantitet uglavnom dvodimenzionalnog medija reprezentacije. U drugoj fazi informacijski sadržaj prenosi se na trodimenzionalni medij, a materijalna sadržina odnosno kvantitet materije postaje predominantna forma. Ove dvije faze u određenoj su korespondenciji, pa se informacijski sadržaj tretira kao formalna analogija materijalnom sadržaju prostorne konstrukcije.

Geometrija primijenjena u inženjerstvu i kreativnom oblikovanju prostora, kao apstraktni sintetički model predstavlja posrednu fazu između visoko apstraktnog matematičkog modela i stvarnog fizičkog materijalnog i egzistencijalnog prostora, omogućavajući korelaciju i koordinaciju između ova dva nivoa. Geometrijski dijagram kao najprikladniji alat za posredovanje ideja i koncepata s višeg nivoa apstrakcije u smjeru njihovih fizičkih i vidljivih manifestacija, postaje mentalna informacijska matrica strukturiranja materijalnog konfiguracijskog prostora arhitektonskog projekta, kao podloga tehničkog crteža.

Problematika geometrijske konceptualizacije u arhitekturi, od modernizma do digitalne arhitekture, vezana je uz direktno prevođenje prostorne sintakse ili prelaku translaciju grafičkih tehnika reprezentacija u izgrađenu formu. Forma reducirana na strukturalne kodove, postaje zamrznuta geometrija i beživotna reprezentacija realnog objekta koji predstavlja živi dinamički kompleks.¹⁹⁰ Arhitektonski dijagram ne predstavlja direktnu reprezentaciju već unutarnju generativnu strukturu i programatsku prostornu organizaciju, prolazeći kroz različite faze formiranja i transformacije, a konačna forma emergira iz višeslojnog varijabilnog polja, kroz višestruke reprezentacije i njihove manifestacije.

¹⁹⁰ Anthony, Vidler. *Diagrams of Diagrams: Architectural Abstraction and Modern Representation. Representations*, No. 72. University of California Press, 2000. pp. 1- 20.

Projektantski proces u arhitekturi uključuje rješavanje problema realnog svijeta, koji je suštinski kompleksan i nadilazi svojom složenošću jednostavnu logiku kojom bi moglo biti obuhvaćeno svo bogatstvo različitih međuodnosa i kojom bi se moglo doći do jasnih rješenja.¹⁹¹ Stoga se problemi arhitektonskog projektovanja smatraju nepotpuno artikuliranim, jer problemski nije do kraja definirana situacija u kojoj djeluje projektant.¹⁹²

Definitivno, jednoznačno i linearno rješavanje problema u ranim fazama projektovanja bilo bi kontraproduktivno dobivanju cjelovitog uvida u rješenje. Projektantski proces se zasniva na konceptualnom mišljenju koje omogućava brzo limitiranje područja mogućih solucija, brze procjene početnih rješenja koje se često odvijaju paralelno, te na njihovoj sintezi, kojom se dolazi do konačnog rješenja koje nije definitivno ni optimalno, već emergira iz mnoštva paralelnih uvida, rješenja i ograničenja koja se pojavljuju kako na početku tako i tokom procesa projektovanja.¹⁹³

U projektovanju je bitno u početnoj fazi suziti prostor istraživanja na najbitnije aspekte, selekcijom i kompresijom velike količine informacija. Limitiranje prostora istraživanja dešava se na nekoliko paralelnih nivoa, od kojih svaki usmjerava pažnju na najbitnije apstrahovane elemente i njihove veze. Geometrijski prostor je apstraktni konfiguracijski prostor koji limitira i strukturira područje mogućeg kombinatoričkog potencijala prostornih formi. Kao apstrahovani prostorni nivoi komprimirane informacije, različiti aspekti tehničkog plana obuhvataju sintaksičke i semantičke grafičke elemente u jedinstvenu cjelinu pogodnu za pohranjivanje, prenošenje i komunikaciju.

¹⁹¹ Herbert, A. Simon. *Sciences of the Artificial*. MIT Press, Cambridge, 1996. p.132.

¹⁹² Nigel, Cross. *Engineering Design Methods: strategies for product design*. John Wiley and Sons Ltd. Chichester, 2008. pp. 14-15.

¹⁹³ Ibid. pp. 6 -11, 14-15.

Problem geometrijskog modeliranja u modernističkoj arhitekturi je oslanjanje na suviše "čiste" forme, efikasne strukture, savršene i kompletne, ne ostavljajući prostor za nemodelirane dimenzije modela.¹⁹⁴ Modeliranje kompleksnog arhitektonskog prostora ne može biti zasnovano samo na "savršenim" linearnim formama, na klasičnim pojmovima dimenzije i dinamike kao linearog kretanja, na identičnosti kao uslovu univerzalnosti i linearnoj beskonačnosti i homogenosti.

Kao aspekt jedinstvenog informacijskog prostora koji uključuje fizički materijalni i mentalni perceptivni prostor, arhitektonski prostor predstavlja dinamičku interaktivnu cjelinu kontinuiranog procesnog karaktera, organiziranu kao sklop nadovezujućih nivoa razvoja podcjelina koje se nadopunjavaju kao otvoreni sistemi. Elementi ovakvih sistema su definirani odnosima i interakcijama, a odlikuje ih raznovrsnost i kompleksna dinamika koja karakterizira prirodne i vještačke prostorne sisteme.

Arhitektonske prostorne strukture predstavljaju višeslojni sistem otvorenog dinamičkog karaktera, svaki nivo rezultanta je prethodnog, ali se ne može jednostavnim raščlanjivanjem svesti na njega. Svi nivoi su međuzavisni i povezani, utičući jedan na drugi, u kompleksnoj dinamičkoj ravnoteži. Prostorna predstava, vezana uz ovakav koncept prostora, ne može biti zasnovana na strukturalnoj zatvorenosti i totalitarnim modelima, već mora sintetizirati statične i dinamičke vidove prostornih struktura; prostor i vrijeme, oblik i kretanje - promjenu, forme i procese, materijalne i nematerijalne vidove stvarnosti, u jedinstvenu, kompleksnu cjelinu. Euklidski, zatvoreni i linearni modeli u arhitekturi ne mogu biti adekvatni navedenim kvalitetima, pa je njihovo nadilaženje kroz kompleksne dinamičke modele jedan od imperativa savremenih diskursa u arhitekturi.

¹⁹⁴ Hilde, Heynen. *Architecture and modernity: a critique*. MIT Press, Cambridge, 1999. pp. 178 -180.

Kompleksniji geometrijski modeli, kao proširenje euklidskog modela, reprezentirani putem računarske grafike, daju mogućnost prostornog modeliranja uključujući karakteristike kao što su niveliranost i nelinearna dinamika, multidimenzionalnost i strukturalna heterogenost. Kompleksnost emergira iz jedinstva opozicije reda i haosa, pravilnosti i nepravilnosti, integracije i diferencijacije, jednostavnosti i prepleteneosti, sličnosti i različitosti.¹⁹⁵



Slika 141.
Emergencija kompleksne arhitektonske forme iz jedinstva pravilnosti i nepravilnosti, sličnosti i razlike.
Zaha Hadid:
Kulturni centar za mlade, Nanjing, Kina,
2018.

Primjena teorije i modela kompleksnih sistema u arhitekturi, ne znači okretanje ka isključivo usko shvaćenom kompjutacijski determiniranom geometrijskom formalizmu, već oslanjanje na sofisticirane mehanizme ljudske percepcije, inteligencije i kreativnosti sintetizirane sa mogućnostima digitalizirane produkcije organskih morfogenetskih principa organizacije, kao kreativne simbioze artificijelnog i humanog potencijala.

¹⁹⁵ Jochen, Fromm. *The Emergence of Complexity*. Kassel University Press, Kassel, 2004. pp. 23-24.

6.5.1. Kompleksna informacijska strukturalna i evolutivna dinamika forme

Kao produkt tehnološke civilizacije arhitektura je postala dio problema prostorne ekspanzije, zasnovane pretežno na klasičnom linearном geometrijskom tretmanu prostora kao neograničene homogene ekstenzije. Pojam ekološke i održive arhitekture obuhvata različite aspekte pristupa kojim bi se arhitektonski objekt adekvatnije integrисao u procese prirodne sredine. Traženje odgovarajućeg prostornog modela u okviru koga bi ova integracija bila posješena, podrazumijeva mogućnost uspostavljanja koordinirane interakcije kompleksnih prirodnih sistema i njihove dinamike u prostoru realiziranom kroz arhitektonsko planiranje i projektovanje.

Linearno planiranje zasnovano na analitičkom pristupu ne može biti efikasno kod projektiranja kompleksnih sistema. Kompleksnost većine arhitektonskih projekata, nadilazi jednostavnost linearog i analitičkog pristupa. Otvaraju se perspektive novog pristupa dizajnu i inženjeringu kompleksnih sistema, kod kojih je uobičajeni centralizirani konceptualni pristup dizajnu zamijenjen evolutivnim, koristeći potencijale kompleksnih sistemskih modela i računarskih simulacija.

Proučavanja svojstava organskog života, njegovih principa dinamičke organizacije i morfogenetičkih manifestacija, uz pomoć računarske tehnologije i teorijskih modela kompleksnih sistema, doprinose boljem razumijevanju i mogućnostima primjene ekvivalentnih principa u procesu planiranja i projektovanja arhitektonskih prostornih objekata.

Arhitektonsko projektovanje se može povezati i sa kompjutacijskom teorijom artificijelnog života (A-life) i na osnovu nje izvesti određeni zaključci o mogućnostima reprezentacije procesne dinamike organske forme utjelovljene u artificijelnim sistemima pa time i u arhitektonskim objektima. Ako se principi dinamičke organizacije organskog kao informacijski sadržaj, mogu apstrahovati iz materijalne baze i prezentirati kao apstraktne strukture koje posjeduju ista svojstva, tada se ovakve strukture mogu reprezentirati i interpretirati i kroz arhitektonsku formu.

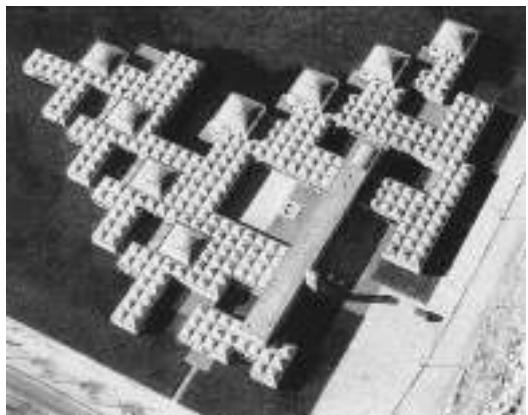
Razvoj interdisciplinarnе naučne teorije artificijelnog života i rezultati istraživanja koja proističu iz njenih fundamentalnih postavki, daju potvrdu nekim principima organske arhitekture koje je definirao još F. L. Wright, te ponovno skreću pažnju na neke trendove u arhitekturi kao što je strukturalistička i metabolistička arhitektura šezdesetih godina 20. stoljeća.

Fumihiko Maki 60-tih godina 20. stoljeća konstataje da u arhitekturi nedostaju koherentne teorije koje bi obuhvatile više od jedne građevine, postavljajući teorijske osnove "kolektivne forme." Kolektivna forma može se razmatrati sa tri aspekta: kao kompoziciona, strukturalna mega-forma i sekvensijalna grupna forma.¹⁹⁶ Strukturalne i grupne forme u teoriji arhitekture nisu bile dovoljno proučavane, dajući prednost kompoziciji formi koja ima po Makiju statičan karakter. Strukturalne mega-forme predstavljaju okvir koji daje podlogu odvojenim fleksibilnim jedinicama koje se uklapaju u strukturni okvir, koji predstavlja generalnu formu koja se može mijenjati u nova stanja zadržavajući vizualnu konzistenciju i osjećaj kontinuiranog reda kroz duže vremenske periode.

¹⁹⁶ Fumihiko, Maki. *Investigations in Collective Form*. A Special Publication Number 2, The School of Architecture, Washington University, St. Louis, 1964. pp. 5-6.

Megastrukture kao sistem koji dozvoljava najveću efikasnost i fleksibilnost s najmanjom organizacijskom strukturom, predstavljaju kompoziciju podsistema koji su cjeloviti i nezavisni a u isto vrijeme u dinamičkoj interakciji sa ostalim podsistemima.¹⁹⁷

Pokret strukturalizma u arhitekturi pokušava arhitekturu integrisati sa socijalnim prostorom, na zajedničkim unutarnjim strukturnim principima koji nadilaze pojedinačnu formu, koja postaje dio globalne strukture, uspostavljajući sistem koji ima svoje kratkoročne i dugoročne dimenzije, kao prostorno-vremenski razvijajuća interaktivna otvorena struktura.



Slika 142.

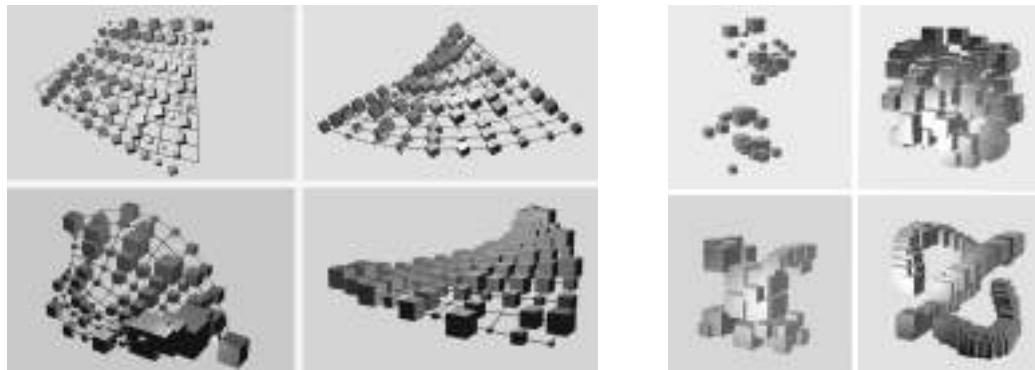
Strukturalistički zasnovane arhitektonske forme.

Aldo Van Eyck: Sirotište u Amsterdamu, 1960. (lijevo)

Kishō Kurokawa: Nagakin kapsule toranj, Tokio, 1972.

¹⁹⁷ Fumihiko, Maki. *Investigations in Collective Form*. 1964. pp. 11-12.

Kao grupnu formu Maki definira formu koja evolvira iz sistema generativnih elemenata u prostoru. Elementi su komponirani kao otvoren sistem razvijajući se sekvencialno u vremenu, sa manjim varijacijama, prilagođavajući se prirodnim uslovima i ljudskoj skali. Naglašen je rast, promjena i adaptabilnost prema okolini, u odnosu na rigidnu geometrijsku strukturu, koja je često naglašena u strukturalističkim principima, gdje generalna fiksna struktura može postati limitirajuća dinamici razvoja.¹⁹⁸ Razlika između mega-struktturnih formi i grupnih formi je razlika između prostornih sistema gdje neka generalna struktura determinira formu prostora, i sistema gdje osnovna jedinica generira globalne prostorne forme svojom dinamikom. Ova dva principa poznati su i kao "odozgo-na-dole" (engl. top-down) i "odozdo-na-gore" (engl. bottom-up) sistemi, koji predstavljaju osnovne principe formiranja složenih sistema.¹⁹⁹



Slika 143.
Osnovni principi formiranja složenih prostornih sistema.
Princip generalne forme date u vidu strukturne mreže i princip jedinične grupne forme.

¹⁹⁸ Fumihiko, Maki. *Investigations in Collective Form*. 1964. pp. 14-16.

¹⁹⁹ Farshid, Moussavi. *The Function of Form*. Harvard Graduate School of Design/Actar, 2009. pp. 29-33.

Teorijska istraživanja vezana za kompleksniju prostornu organizaciju i formu definiranu kao dinamički kolektivni entitet, koja su začeta 60-tih godina 20. stoljeća, nisu razvijena u dovoljnoj mjeri zbog ograničenja načina modeliranja, koje nije bilo moguće adekvatno reprezentirati klasičnim geometrijskim konceptima i modelima. Razvoj teorije kompleksnih sistema s jedne strane i razvoj dinamičkih informacijskih modela s druge krajem 20. stoljeća, ponovo vraćaju u fokus dinamički karakter kolektivne forme.

Savremena arhitektura digitalnog doba pokušava se osloboditi uniformne linearnosti i klasične kompozicione forme, producirajući forme nelinearnog kompleksnog karaktera. Fragmentacija i višeslojna modulacija forme, daju naznake novog pristupa prostornoj kompoziciji, koji ocrtava osnovne preduslove ustrojstva nelinearnih organskih sistema. Nadilaženje uniformne repetitivnosti, kao predominantne kvalitete moderne forme u dobu masovne fabricirane produkcije, arhitekturu vodi ka novom organičko - informatičkom dobu, kompleksnoj formi i njenoj evolutivnoj genetici.



*Slika 144.
Višeslojna modulacija nelinearne
forme kompleksnog karaktera.
Bjarke Ingels - BIG: 79&Park,
Stockholm, 2018*

Odlika novijih prostornih koncepcija u arhitekturi potpomognutih informacijskom tehnologijom i kompjutacijskim tehnikama modeliranja je organska kompleksnost kroz razvojne nivoe koji su u određenoj korespondenciji. Arhitektonska forma tretirana je kao neprestano promjenjiv sistem sačinjen od razvojnih modula inkorporiranih u bazične strukturne komponente. Koegzistencija različitosti, diferenciranost i nивелiranost kao primarne odlike kompleksnih prostornih koncepcija, ne znače jasno odvajanje podsistema koji predstavljaju prostorne oblike i forme, već se oni prožimaju i prepliću, ostavljujući nejasno odredive granice.

Imitacija prirodnih formativnih procesa u arhitekturi rezultira "evolutivnom" arhitekturom koja se nadovezuje na pojam organske arhitekture, uključujući i kompjutacijske mehanizme algoritamskog modeliranja prostornih formi.²⁰⁰ Arhitektonska kreacija tretira se kao dijalog formalne ideje i parametara vanjske okoline. Arhitekt prenosi kodove prostornih formi koji predstavljaju uzorce i oblike naslijedene kroz prethodno stečena iskustva i transformiše ih prilagođavajući se datom okruženju. Evolutivna arhitektura koristi se znanjima iz područja genetike, povlačeći paralelu sa biološkim procesima generiranja formi putem genetskog koda i utjecaja vanjske sredine, koji rezultiraju mnoštvom varijacija u cilju prilagođavanja promjenama u okolini. Arhitektonsko oblikovanje odvija se u vidu unošenja određenog oblikovnog genetskog koda, razvijenog pomoću računarskog programa, u seriju modela koji predstavljaju simulirane procese vanjske okoline. Evolutivni razvoj forme rezultira bogatim varijacijama koje nastaju kao rezultanta različitih procesa, a ne kao kompozicija prethodno definiranih formi²⁰¹.

²⁰⁰ Evolutivna arhitektura bazirana na kompjutacijskim modelima teoretski je razrađena u radu Johna Frazera krajem 90.god. 20 st. John, Frazer. *Evolutionary architecture*. Architectural Association, London, 1995.

²⁰¹ Ibid. pp. 58-59, 65-66.

Evolutivni model generiranih formi, korespondentan je realnom "životu" jednog arhitektonskog objekta, izloženog različitim fizičkim, klimatskim i biološkim procesima, kao djelovanju vanjske sredine koje mijenja njegovu formu. Prostor koji se ocrtava u evolutivnom modelu ima multivarijantni karakter nastao kao posljedica multipliciranih djelovanja vanjske okoline, nesvodiv na jednostavne, osnovne elemente kao kompozicionu osnovu složenijih struktura. Prostor ima procesni karakter i u stalnom je toku transformisanja, što je rezultat izloženosti mnoštvu različitih dejstava.

Pojam evolutivnog dizajna vezan je za pojам generativnog dizajna, koji označava primjenu nekog generativnog sistema koji može biti programski strukturiran lingvistički, formalno i algoritamski. Iz programiranih procedura, na osnovu datih parametara i uslova, sistem generira varijabilna rješenja, uz različito definirane stepene autonomije.



Slika 145.

Evolutivna forma kao rezultanta definiranih parametara generativnog programskog sistema.

Jürgen Mayer: Metropol Parasol, Sevilla, Španija, 2011.

Problematika generativnog i evolutivnog dizajna, odnosi se na načine definiranja relevantnih parametara, kao i na limitiranost operativnog prostora, uslovljenog formaliziranim interpretativnim područjem. Iako je omogućeno izuzetno bogatstvo varijacija, postavlja se pitanje otvorenosti ka kvalitativno novim rješenjima koja izlaze iz područja konceptualnog prostora datog sistema. Time je moguće povući paralelu sa problematikom limita euklidske geometrije, odnosno limita jednog formalnog determiniranog sistema.

Generativni sistemi predstavljaju informacijske sisteme kod kojih je opis konačne forme zamijenjen opisom procesa koji konstituiše formu, transformacijama iz početnih jednostavnih uslova. Kompleksnost forme zamijenjena je jednostavnim polaznim podatcima i jednostavnim procedurama koje se sukcesivno primjenjuju u određenim prostornim ili vremenskim sekvencama. Postoje određeni problemi u dizajnu samih generativnih sistema, kada je kompleksnost opisa finalne forme zamijenjena kompleksnošću opisa generativne procedure.

Primjenom metodologije nelinearne, paralelne informacijske razvojne reprezentacije, bazirane na simulaciji samoorganizirajućeg razvoja i evolucije organskih sistema, moguća je produkcija kompleksne arhitektonske forme na analognim principima. Inspirisani istraživanjima generativnih mehanizama i informacijskih kodova evolutivne organske forme u arhitekturi se javljaju i novi prostorni kompozicioni modeli koji su bazirani na serijacijama jednostavnih diskretnih elemenata povezanih lokalnim tranzicijskim procesima, produciraјući kompleksne funkcionalne i morfološke strukturalne cjeline na principima informacijsko – procesne formalne determinacije. Princip modularnosti iz koje emergira kompleksna forma, postaje karakteristika generiranih formi koje posjeduju svojstva adaptabilnosti i modifikacije u različitim scenarijima u kojima nije moguće predvidjeti sve faktore koji mogu imati utjecaj na stabilnost i organizaciju forme.

6. 5. 2. Kompleksna modularnost i digitalna materijalnost forme

Modularni sistemi po klasičnom tumačenju u arhitekturi su uglavnom vezani za jedinični modul, koji definira mjeru svih ostalih arhitektonskih elemenata, formirajući geometrijski sistem koji predstavlja osnovnu podlogu rješenja. Modularnost je u modernoj arhitekturi povezana uz geometrijsku formalizaciju i mrežnu reprezentaciju, repetitivnu multiplikaciju i industrijsku serijalizaciju.

U sistemskom pristupu koji se javlja u vidu strukturalističke prostorne koncepcije u arhitekturi, modularni dizajn podrazumijeva određenu autonomnost većeg broja modula unutar prostornih sistema. Moduli nisu u potpunoj ovisnosti o cjelini, pa mogu biti dizajnirani svaki za sebe. Oni mogu biti zamijenjeni ili funkcionirati u različitim skloporimama, kao multifunkcionalne jedinice.

Nove definicije modularnosti podrazumijevaju kompleksno ustrojstvo modularnih sistema. Modularnost danas dobiva šire značenje, postajući jednim od ključnih metoda dizajniranja i upravljanja kompleksnim sistemima.

U industrijskom dizajnu modularnost se koristi da bi se konfiguracija proizvoda prilagodila individualnim kupcima, omogućivši varijacije jednog produkta u isto vrijeme ne povećavajući cijenu troškova. Kompatibilnost komponenti omogućava varijabilne konfiguracije koje mogu zadovoljiti specifične individualizirane preferencije, omogućivši fleksibilnost u svim smjerovima, kako oblikovno-funkcionalnim tako i u razvojnim kroz određeno vrijeme.

Pristupi bazirani na teoriji kompleksnih sistema daju i nove dimenzije pojmu modularnosti u arhitekturi. Osnovne strategijske tehnike kojima se kompleksni problemi savladavaju su apstrakcija, modularnost, nivелiranje i hijerarhija.

Arhitektonska forma uglavnom nastaje kao produkt procesa analitičke dekompozicije na poddijelove, te njihove sinteze kroz konstruktivne i funkcionalne prostorne zahtjeve u konačnu formu objekta. Za jednostavne prostorne sisteme ovaj proces sinteze se može zasnivati na kompoziciji elementarnih dijelova u jedinstvenu cjelinu aditivnim postupcima. Kompleksni sistemi su više od sume dijelova, te njihovo planiranje zahtjeva specifične metode. Planiranje kompleksnih modularnih sistema zahtjeva viši nivo apstrakcije.

Geometrijska matrica modularnih prostornih sistema je hijerarhijska mrežna struktura koja izražava prostorne potencijale i mogućnosti, koje mogu biti aktualizirane u različitim pojavnim prostornim vidovima lokalnog i globalnog dometa. Matrica kompleksnog karaktera omogućava nelinearnu mrežnu povezanost između raznolikih varijacija pojedinačnih dijelova, u mnoštvu kombinacija različitih nivoa i smjerova. Mnoštvo različitih poveznica jednog fragmenta sa drugima, susjednih i udaljenih zona, mnoštvo putanja njihovog uzajamnog dodira i ukrštanja, čine megastrukturu matrice koja kao živo dinamičko tkivo pohranjuje informacije o međusobnim relacijama.

Modularni principi organizacije i modeliranja kompleksnih sistema, ne odnose se samo na apstrahovane geometrizirane eksterne prostorne konfiguracije, već i na materijalizaciju i internu digitalizaciju forme. Modularne konekcije uslovljene su funkcionalnim i strukturalnim zahtjevima i njihovim parametrima.



Slika 146.
Modularni principi organizacije
prostornih sistema bazirani na internoj
digitalizaciji forme;
Bjarke Ingels: Paviljon Serpentine
galerije, London, 2014.

Iz digitaliziranog informacijskog modela nastaje forma koja gubi svoju geometrijsku čistoću i idealnost i postaje materijalna. Odnos idealnog i geometrijskog, fizičkog i materijalnog preispituje se u novim tendencijama kroz informacijski modeliranu formu, ne samo u odnosu na njihov hijerarhijski odnos već se pretvara u pitanje šta je forma i šta je materija, u odnosu na različite konceptualne modele.

Digitalna arhitektura je modelirana u virtualnom prostoru kome naizgled nedostaje materijalnost. Ali fluidnost i kompleksnost digitalizirane forme postaju izvor nove materijalnosti. "Digitalna materijalnost" nije samo digitalizirana, već je smještena između potpune apstrakcije kodova i hiper-materijalnosti kao neizmjerne složenosti fizičkih i perceptivnih podataka sadržanih u procesu projektovanja i njegove vizualizacije.²⁰² Od bezlične pasivne tvari materija postaje aktivna, komunikativna, informativna.

²⁰² Antoine, Picon. Architecture and the virtual, Towards a New Materiality. Thesis, Heft 3, Bauhaus-Universität Weimar, 2003. pp. 107-111.

Oblik kao materijalnu konfiguraciju ne određuju idealizirani pojmovi forme; naprotiv, dekodiranje materijalnih podataka i njihova obrada digitalnim tehnologijama postaju glavni generator forme. Forma nastaje kao rezultat materijalnih performansi, time materija nije više limitirana formom već materijalni parametri postaju generator ograničenja forme. Proces materijalizacije nije sekundaran već postaje dio sinergijskog generativnog interaktivnog sistema digitalne morfogeneze, kroz kompjutacijsku mrežu kao otvoreni model, informiranu materijalnim i produksijskim ograničenjima.²⁰³ Kompjutacijska mreža može biti evolutivna, kroz primjenu genetičkih algoritama razvijaju se različite generacije bazirane na dinamici mutacija, varijacija, selekcije i naslijeda.

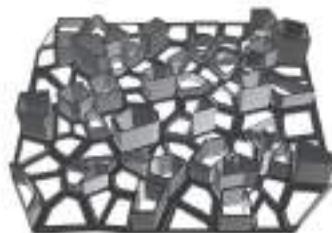
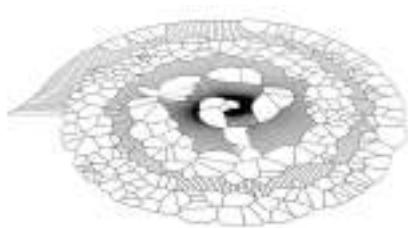
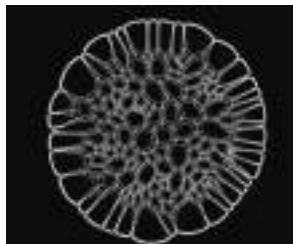


Slika 147.
Dinamika mutacija, varijacija i naslijeda uz mogućnosti selekcije, kao produkt genetičkih algoritama.
Prikaz dvodimenzionalnog mrežnog faznog prostora interaktivnog genetičkog generativnog sistema.

²⁰³ Achim, Menges, Computational Morphogenesis: Integral Form Generation and Materialization Processes. 2007. pp. 725-744.

Geometrijska definicija evolutivnih morfogenetskih kompjutacijskih sistema nije bazirana na metričkim formama, već kao mreža mogućih formacija omogućava dalju diferencijaciju koherentnu sa fizičkim parametrima.²⁰⁴ Inkorporiranjem materije u početne faze dizajna, kada je forma apstraktna, geometrijska, geometrizirani su i materijalni negeometrijski atributi.

Kompjutacijski dizajn i digitalna proizvodnja omogućavaju kreiranje kompleksnih formi, koje nisu geometrijski homogene strukture, već manifestiraju bogatstvo heterogenih skala veličina i transformabilnih oblika, baziranih na različitim kompjutacijskim i geometrijskim modelima koji nadilaze klasične okvire lokaliziranom dinamikom i materijaliziranim parametrima, koje su u korelaciji sa prirodnim organskim materijalnim sistemima.



Slika 148.

Heterogene kompleksne geometrijske strukture - Voronoi geometrijski diagram.

Heterogeni celularni prostor baziran na podjeli regiona u odnosu na lokalne distance pojedinačnih tačaka u prostoru.

²⁰⁴ Achim, Menges, Computational Morphogenesis, Integral Form Generation and Materialization Processes, 2007. pp. 725-744.

Svi materijalni sistemi su u novom materijalizmu protogeometrijski, ujedno i fizički i mentalni, specifični ali ne i egzaktni. Osnovne materijalne jedinice nisu geometrijski fiksne, već su adaptabilne i varijabilne, posjedujući beskonačne potencijale stvaranja novih nepredvidivih formi.²⁰⁵



Slika 149.

Arhitektonski objekti kao kompleksne modularne strukture generirane iz adaptabilnih varijabilnih jedinica.

Bjarke Ingels BIG: 8 Tallet, Copenhagen, 2010.

Ofis Arhitekti: Tetris apartmani, Ljubljana, 2007.

²⁰⁵ Farshid, Moussavi. The Function of Form. 2009. pp. 29-33.

U relaciji sa okolinom, materija transformiše i sebe i svoju okolinu, stvarajući beskonačan prostor interaktivnosti i transformabilnosti. Nadilazeći svoje kontekstualne limite materijalni sistemi postaju aktivni u procesu samo-transformacije, ne samo realizirajući svoje varijabilne manifestacije kroz procese evolucije već nadilazeći svoje kodove stvarajući nove, kroz procese emergencije. Forma nastaje kao emergentno stanje transformabilne materije, reorganizacijom starih pravila i lomom simetrije²⁰⁶ kao kreiranjem razlike, ne samo kao novom kvantitativnom već i kvalitativnom dimenzijom.

6.5.3. Parametarsko informacijsko modeliranje

Parametarsko modeliranje je informacijski determinirano modeliranje forme kojim je omogućeno definirati konstruktivnu logiku i geometriju objekta, uz mogućnost mijenjanja pojedinačnih geometrijskih parametara kao varijabli.²⁰⁷ Geometrijski parametri mogu biti povezani sa strukturalnim ili okolišnim parametrima. Čitav niz subsistema nelinearno povezanih čini mrežu relacija u vidu kompleksne cjeline prilagodljive utjecajima i zahtjevima okoline. Geometrija objekta u parametarskom projektovanju nastaje kao rezultat niza povezanih operacija. Mijenjanjem određenih varijabilnih parametara mijenja se geometrija objekta povezano u cijelom modelu. Varijabilni parametri mogu se odnositi na metrička ili druga geometrijska ili fizička svojstva. Geometrijski elementi i operacije su povezani u kontekstualne cjeline, producirajući kompleksne adaptabilne dinamičke forme.

²⁰⁶ Lom simetrije je fizikalni pojam koji opisuje fenomene u tranzicijskim područjima kada fizički sistemi mijenjaju strukturne kvalitete iz manje uređenih nedeterminiranih stanja u informacijski definirana stanja.

²⁰⁷ Patrik, Schumacher. Design Parameters to Parametric Design. u Mitra, Kanaani. Dak, Kopec. Ed. The Routledge Companion for Architecture Design and Practice: Established and Emerging Trends, Routledge, Taylor and Francis, New York, 2016.

Potpomognut informatičko-tehnološkim potencijalima parametricizam u arhitekturi uspostavlja sistemski okvir ograničavajućih determinanti u postupku traženja procesne forme kroz varijabilne parametre. Parametarski dizajn uključuje ne samo opis gotove finalne forme prostornog objekta, već opis razvojnih generativnih procesa, kao topološki izraz varijabilne forme. Možemo reći da je razlika parametarskog modeliranja i klasičnog modeliranja u tome što parametarski modeli predstavljaju procesne modele kao algoritme iz kojih izrasta sistem koji predstavlja opis razvojnog procesa forme, koji zatim može biti limitiran datim setom parametara u finalni oblik.

“Parametarski model može se smatrati kao opći gradbeni plan ili genotip za generiranje mnoštva različitih verzija ili fenotipa koji mogu istovremeno koegzistirati.”²⁰⁸ Parametarsko modeliranje definira generativne strukturalne odnose, iz kojih emergira forma kao rezultanta graničnih uslova i međusobnih relacija mnogostrukih parametara. Forma nije definirana kao samo jedno konačno rješenje, već postaje fazno područje mogućih stanja interaktivnog procesa transformacija ovisnih o datom prostornom kontekstu.²⁰⁹



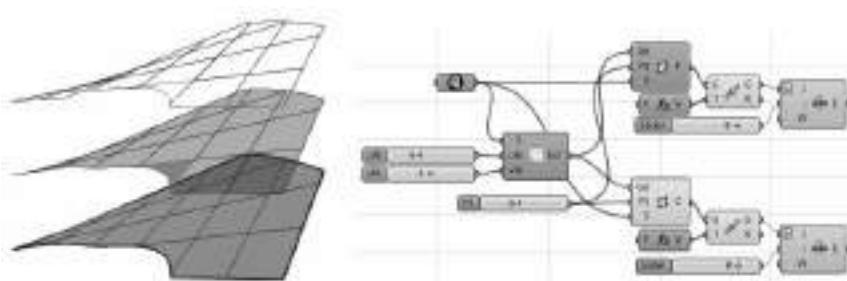
Slika 150.
Parametarsko
modeliranje forme koja
postaje fazno područje
mogućih stanja procesa
transformacije.

²⁰⁸ Schumacher, Patrik, Design Parameters to Parametric Design. 2016.

²⁰⁹ Rivka, Oxman. Theory and design in the first digital age. 2005. pp. 229- 265.

Parametricizam se povezuje uz kontekstualnu senzitivnost i adaptabilnost forme koja nastaje kroz parametarske granične uslove i kontinuiranu diferencijaciju varijabilnih rješenja. Dijelovi parametarskog modela su individualizirani i parametrizirani submodeli koji su povezani u jedinstven model, regulirani unutarnjim varijabilnim parametrima koji se prilagođavaju vanjskim uslovima i ograničenjima.

Parametarsko projektovanje zahtijeva viši nivo apstrahovanja od klasičnog načina projektovanja, jer je potrebno apstrahovati generičke klase rješenja sa minimalnim setom parametara koji otvaraju solucijski prostor dovoljno velik da može obuhvatiti sve potrebne varijante.²¹⁰ Izbor rješenja nije jednostavan ni optimalan, jer je potrebno odabrati najsvrsishodnije rješenje u datim okvirima, koji obuhvataju i konfliktne parametre. Iako je parametarski dizajn postao izvorom novih potencijala generiranja forme, postoje određeni problemi vezani za adekvatan programski jezik kojim bi parametarske funkcije bile izražene. Struktura, sintaksa i semantika vizualnog programiranja koje se razvija u novijim programskim opcijama još uvijek nije dovoljno sistemski integrisana.



Slika 151.

Vizualno programiranje
kao metoda računarskog
geometrijskog
modeliranja.

Grashopper, Rhinoceros

²¹⁰ Fabian, Schemer. Materialising Complexity. u *The New Structuralism*, AD, vol. 80. no 4, Wiley, 2010. pp. 86-94.

Vizualno programiranje svojom deskriptivnom kompleksnošću često nadilazi praktične limite smislenog i svrshodnog poimanja. Oslanjanje procesa projektovanja na racionalnu deskriptivnu formu "digitalnog" i parametarskog dizajna vezano je i uz tendencije primjene vještačke inteligencije na osnovu formaliziranih kompjutacijskih jezika i njihove sintakse iz koje bi proizilazila determinacija forme kao informacijskog modela.

Razvoj metoda parametarskog dizajna uz koji se s druge strane razvija tehnologija Informacijskog modeliranja gradnje (BIM), u fokus stavlja neke teoretske aspekte arhitekture koji geometrijsku konceptualizaciju i determinaciju forme vezuju uz jezičke strukture. Povezivanjem geometrije ne samo sa numeričkim metričkim matematskim strukturama već i lingvističkim strukturama, geometrija dobiva izuzetno kompleksnu kontekstualnu dimenziju.

Geometrijska forma se može posmatrati i kao dio hijerarhijskog sistema jezika arhitekture, koji ima svoju strukturnu osnovu baziranu na geometrijskim formama. S jedne strane geometrija može biti osnova definiranja parametara elementarnih oblika i konstruktivnih sklopova, a s druge načina njihovog povezivanja u jedinstvenu konstruktivnu, funkcionalnu i oblikovnu cjelinu.

Arhitektonska teorija vezana za gramatiku forme razvija se u nekoliko smjerova, s jedne strane pokušavajući sistemski definirati tipske oblikovne elemente arhitekture, a s druge strukturni okvir njihovog povezivanja. Prvi pristup često uzima kao osnovu elementarne geometrijske forme: kvadrat, krug ili pravougaonik, definirajući ih kao kompozicione elemente čijom adekvatnom organizacijom se stvara kompleksnija prostorna organizacija.

Teoretska istraživanja sa ciljem definiranja gramatika arhitektonskog jezika, još od Vitruvija, preko Paladija, strukturalističkih tendencija modernizma, do gramatike forme²¹¹ potpomognute informacijskom tehnologijom, obuhvataju različite aspekte u kojim geometrija predstavlja ne samo regulativni već i generativni sistem kreiranja složenih prostornih objekata.

Metrika i sintaksa arhitektonske forme usko vezani uz geometrijsku formu, pružaju mogućnosti parametarskog i strukturalnog generiranja forme, ne kao fiksnih pravila i tipskih redova, već kao otvorenih generaliziranih programatskih modela. U okviru ovakvih modela, jedno jednostavno pravilo može pružiti izuzetno veliki broj mogućnosti u univerzumu slično strukturiranih objekata.²¹²



Slika 152.
Parametarski strukturalno
generirana arhitektonska
forma kroz otvoreni
programatski model.

Herzog & de Meuron,
Nacionalni stadion, Beijing,
2007.

²¹¹ Gramatika forme (engl. shape grammar) kao oblast koju je uspostavio u svojim radovima George Stiny, bazirana je na kompjutacijskim procesima generiranja forme na osnovu geometrijskih pravila kombiniranja i transformacije geometrijskih oblika u složene cjeline.

²¹² William, J. Mitchell. *The Logic of Architecture*. MIT Press, Cambridge MA, 1990. pp.134-135.

Istraživanja na razvijanju teoretske sintaksičke baze gramatike forme imaju s jedne strane cilj definiranje programatskih pravila iz kojih se mogu dobiti varijabilne instance, a s druge ograničenja mogućih stanja u projektovanom prostoru. Sintaksa jezika arhitekture ima svoje i generativne i regulatorne aspekte.

Parametarsko definiranja strukturalističke osnove arhitektonskog jezika, obuhvata različite modele od "top-down" do "bottom-up" sistema, kao i problematiku linearног razvijanja sekvenci strukturalnog povezivanja osnovnih generativnih struktura.

Trodimenzionalnost arhitektonske forme nadilazi linearne načine modeliranja, a njena funkcionalna i socijalna dimenzija, daju joj i višedimenzionalni karakter. Istraživanja u cilju definiranja sintaksičkih strukturnih zakonitosti koje mogu predstavljati generativne mehanizme u arhitekturi, potencirani razvojem informacijske tehnologije i vještačke inteligencije, moraju uzeti u obzir kompleksnost i višedimenzionalnost arhitektonskog prostora, zahtijevajući uvid u kompleksne dinamičke aspekte geometrijskog modeliranja.

H. Simon naglašava problematiku nejasnih granica prirodnog, biološkog i umjetnog okruženja i potrebu sveobuhvatnog pristupa.²¹³ Uz potrebu za integralnim pristupom shvatanju i povezivanju prirodnog i artificijelnog okruženja, potreba za intelligentnim rješenjima koja nadilaze uske formalizirane programske okvire postaje jednim od bitnih pitanja vezanih za informacijske modele i njihovu primjenu u kreativnim procesima. Parametarski dizajn oslonjen na strukturni opis generiranja formi, iako ima velike dinamičke transformacijske potencijale, sam po sebi nije dovoljno otvoren i povezan sa složenijim nivoima ljudskog razumijevanja i inteligencije, koji doprinose nastanku informativnih i smislenih rješenja, naročito u novim situacijama.

²¹³ Herbert, A. Simon. *Sciences of the Artificial*. MIT Press, Cambridge MA, 1996. pp. 2-3.

Potencijali arhitektonske kreativnosti mogu da budu zarobljeni u naglašenu sintaktičku deskriptivnost dostupnih jezika vizualnog programiranja, koji su dati na raspolaganje arhitektima kao posrednici između kompleksnijih programskih jezika i operativnih grafičkih reprezentacija parametarski modelirane geometrijske forme.

Kao reakcija na tendencije sintaktične deskriptivnosti parametarskog dizajna, javljaju se različiti kritički osvrti naglašavajući interpretativnu i intuitivnu osnovu procesa projektovanja, koji se ne može svesti isključivo na formalizirane jezike i naglašenu deskriptivnost modela. Ukoliko bi se izjednačili struktura modela i polje značenja, odnosno izjednačili model i objektivna situacija, zatvorio bi se projektni prostor ka novim rješenjima.²¹⁴ Model je uvijek više od strukture, a stvarnost više od modela._Modeli su više od strukture jer su otvoreni ka višestrukim interpretacijama, u dijalogu sa konkretnom situacijom. Iz ove otvorenosti, stvaraju se novi koncepti i nove kreativne ideje.

Modeliranje multidimenzionalnog informacijskog prostora u arhitekturi obuhvaćeno tehnologijom informacijskog modeliranja građenja - kao BIM²¹⁵ tehnologijom, donosi nove aspekte i nove mogućnosti, ali i nova pitanja i probleme odnosa modela i konkretne realnosti.

²¹⁴ Adrian, Snodgrass, Richard, Coyne. Models, Metaphors and the Hermeneutics of Designing. *Design Issues*, vol. 9. No.1. 1992. pp. 56-74.

²¹⁵ pojam BIM izведен je kao skraćenica engl. izraza Building Information Modeling.

6.5.4. Modeliranje multidimenzionalnog informacijskog prostora u arhitekturi

Pojam modeliranja potenciran je prelaskom na digitalizaciju procesa oblikovanja i grafičke reprezentacije arhitektonskog projekta, dobivajući šire i dublje značenje od uobičajenog trodimenzionalnog prikaza koji je predstavljao materijalizaciju arhitektonske prostorne ideje u nekom manjem mjerilu. Geometrijsko modeliranje postaje osnovom CAD²¹⁶ tehnika koje se dalje razvijaju u CAD/CAM²¹⁷ i BIM tehnologije.

Novi principi "digitalnog" modeliranja odvojeni od starog "analognog" ručnog grafičkog modeliranja prostora, promovišu "kompjutacijski dizajn" predstavljen kao novi nivo digitalne paradigmе, uspostavljen "radeći na reprezentaciji procesa dizajna koja, kada se izvrši, generiše projekat..."²¹⁸ Digitalna tehnika modeliranja proizvodi informacijski kontinuum od projekta do konstrukcije, integrirajući različite nivoe modeliranja koji su u ranijoj praksi bili odvojeni po različitim fazama i imali različite oblike deskripcije. Informacije u digitalnom modelu više nisu organizirane kao grafički reprezentacijski "layeri" rane CAD tehnologije, već kao slojevi informacija, odvojeni semantičkim interpretacijskim nivoima, koji se mogu kombinirati u različitim scenarijima.

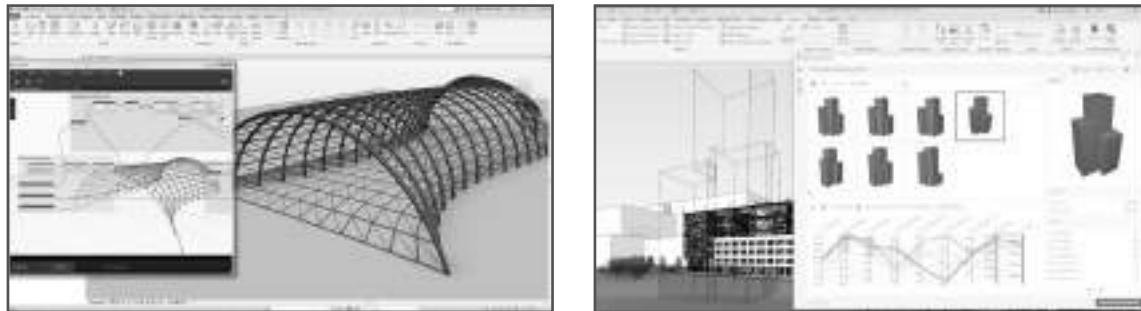
²¹⁶ CAD je skraćenica engl. izraza Computer Aided Design - Projektovanje pomoću kompjutera

²¹⁷ CAM je skraćenica engl. izraza Computer Aided Manufacturing - Proizvodnja pomoću kompjutera

²¹⁸ Robert, Aish. N. Bradella. The Evolution of Architectural Computing: From Building Modeling to Design Computation. Architectural Research Quarterly, vol 21(01), 2017. pp. 65-73.

BIM tehnologija omogućava strukturaciju informacija koje integrišu geometriju, konstrukciju i produkciju objekta, uključujući različite fizikalne parametre, objedinjujući do tada razdvojene projektne faze. Umjesto heterogenosti reprezentacija cilj BIM-a je objedinjenje jedinstvenim 3D modelom koji teži da postane sve realniji, povećanjem broja dimenzija, dodavanjem različitih semantičkih informacijskih nivoa i serija novih parametara, proizašlih iz materijalnih ili proizvodnih uslova i ograničenja.

Složeni postupak informacijskog modeliranja uključuje ovisne i neovisne varijable, različite hijerarhije i različite dimenzije. Međusobna povezanost dimenzija i parametara može se procjenjivati na temelju različitih kriterija, kroz različite kvantitativne i kvalitativne aspekte, koji s jedne strane obuhvataju konstruktivne, energetske i ekonomski, a s druge sociološke, kulturološke i estetske zahtjeve.



Slika 153.
BIM modeli objedinjavaju heterogene reprezentacije u jedinstven 3d model
Autodesk Revit + Dynamo

Uobičajen način projektovanja je da numerički ili kvantitativni zahtjevi u prvoj fazi dizajna nisu prioritetni niti su jasno naznačeni. Tek u zadnjoj izvedbenoj fazi stupaju u prvi plan. Time je projektovanje u idejnom području multivalentno, otvoreno, da bi se tek na kraju projekt zatvorio u numeričke limite i dobio jasnu deskripciju.

Radikalna integracija različitih aspekata projekta kroz BIM tehnologiju, može uzrokovati i negativne posljedice, ukoliko ovakvi modeli dovode do zatvaranja procesa modeliranja u ograničeno područje determiniranog kompjutacijskog mehanizma. Problematika BIM modela je u njihovom prernom zatvaranju i integraciji u determinističke okvire koji ne dozvoljavaju objedinjavanje često kontradiktornih zahtjeva projekta. Kolarević upozorava na problematiku moguće zatvorenosti sistema integracije, te navodi da je potrebno integriruće tendencije držati što je moguće više otvorenim i konceptualno i operativno.²¹⁹ Konceptualni i strukturalni modeli u obliku kompjutacijske platforme trebaju biti otvoreni, da bi se mogli razvijati zajedno sa razvojem modeliranog sistema, integrirući ideje, procese i tehnike različitih domena.

Informacijski modeli zasnovani na obimnim kvantitativnim racionalnim parametarskim okvirima, s težnjom da u potpunosti simuliraju i predstave stvarni objekt u svim njegovim aspektima, dovode do opasnosti da se stvarni objekt poistovjeti sa modelom.

BIM ne bi trebalo posmatrati samo kao tehnološki napredak u razvoju softvera i načina reprezentacije projekta, već u okviru dalekosežnih promjena u kulturi projektovanja, organizaciji i infrastrukturi posla i timskog rada unutar arhitektonske profesije.²²⁰

²¹⁹ Branko, Kolarevic. Post-Digital Architecture: Towards Integrative Design. *First International Conference on Critical Digital: What Matters(s)?*, 2008. pp. 149-156.

²²⁰ Dominik, Holzer. BIM's Seven Deadly Sins. *International Journal of Architectural Computing*, 9(4). 2011. pp. 463-480.

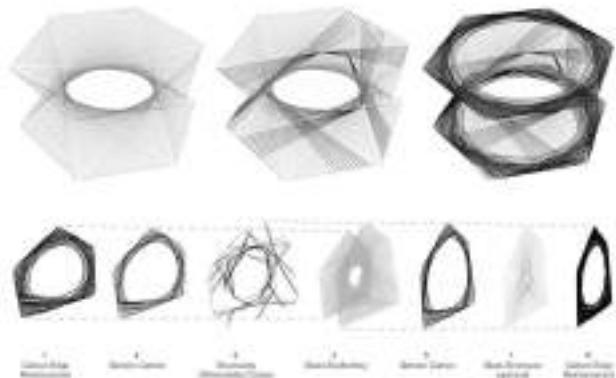
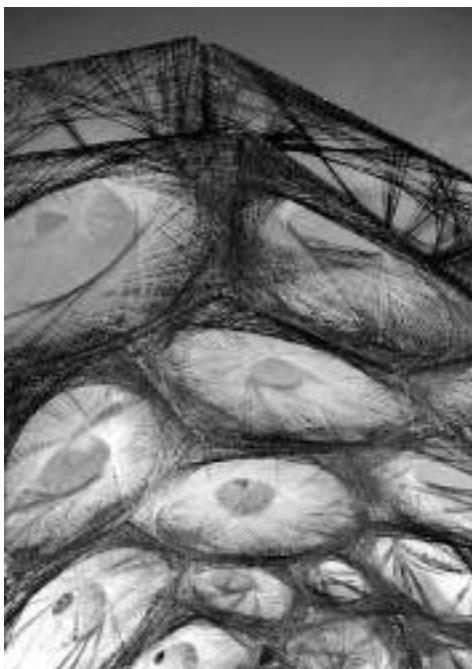
BIM modeli sistematski su okvir reprezentacije prostornih formi koji ne trebaju biti primarno strukturalno metrički već topološki i semantički organizirani, povezujući geometriju ne samo sa materijalizacijom i kvantifikacijom, već i sa značenjima u širem funkcionalnom i korisničkom kontekstu.

Formalne operacije koje danas predstavljaju osnovu informacijskih programske sistema postavljene su u pozadinu, a programski jezik kojim se kompjutacijski algoritamski objekti transformiraju koristi se od strane korisnika na nedeterminiran način. Nemogućnost potpune prostorne kontrole i ograničenja korisničkog interfejsa CAD softvera, zahtijevaju da projektant na određen način uđe dublje u logičke matrice formalnih računarskih programske jezike i logike programiranja.

Novi principi "digitalnog" modeliranja odvojeni od starog "analognog" ručnog grafičkog modeliranja prostora, promovišu "kompjutacijski dizajn" predstavljen kao novi nivo digitalne paradigme. Kompjutacijski dizajn uz ubrzenu proizvodnju velikog broja varijantnih rješenja kroz kompjutacijske projektne metode, dovodi do problematiziranja uobičajene reprezentacije projekta.²²¹ Vezujući direktno informatički upravljane robotske mašine uz produkciju i gradnju kroz skriptirani kompjutacijski jezik umjesto grafičkih tehničkih crteža, dominaciju 2D tehničke reprezentacije, slijede vezano za digitalno modeliranje ne samo 3D modeli već 4D, 5D i 6D modeli²²². Jezik formalne logike računarske mašine i algoritamska pravila dizajna, definiraju model dizajniranog objekta kao kompjutacijskog procesa.

²²¹ Robert, Aish. N. Bradella. The Evolution of Architectural Computing: From Building Modeling to Design Computation. 2017. pp. 65-73.

²²² 4D uključuje i vremensku dimenziju projekta, 5D uključuje informacije vezane za ekonomski troškove gradnje, a 6D informacije vezane za održavanje i upravljanje.



Slika 154.

Kompjutacijski način projektovanja koristi digitalne modele povezane sa robotskim mašinama koje izvode proces proizvodnje.

ICD/ITKE Istraživački Pavilion, Univerzitet u Štutgartu,
2013-14.

BIM modeli kao dodatak grafičkim metodama i geometrijskoj aspstrakciji, približavaju apstrakciju korak bliže fizičkoj i materijalnoj dimenziji objekta. Ipak, oni još uvijek predstavljaju neadekvatnu reprezentaciju objekta, jer im nedostaju različite kontekstualne reference koje se odnose na korisničku upotrebu i razumijevanje odnosa funkcija sa širim društvenim i kulturnim kontekstom.²²³

²²³ Yehuda, Schaumann, Kalay., Seung, Wan Hong, Davide, Simeone. Beyond BIM: Next-Generation Building Information Modeling to Support Form, Function, and Use of Buildings. u M. Kensek, Karen. Noble, Douglas. eds. *Building Information Modeling: BIM in Current and Future Practice*. John Wiley & Sons, 2014. pp. 323-334.

Ostaje otvoreno pitanje multipliciranja dimenzija projektne faze i njihove uzajamne korespondencije u odnosu na kreativnu komponentu projekta. Kreativnost i inteligencija su svrshodni u novim i nepredvidivim situacijama u kojim je potrebno modifcirati postojeće sisteme reprezentacije.

Digitalna tehnologija u oblasti arhitekture naizgled prijeti preuzimanjem kontrole, svodeći značaj projektantske uloge na periferiju hardverske i softverske manipulacije, zbog ekstremno obimnog kvantiteta podataka i parametara koji postaju regulator nastanka projekta. Stoga je u arhitekturi otpor kvantitetu parametarskih relacijskih matrica i oslanjanje na informacijsku racionalizaciju procesa projektovanja počeo dobivati značajniju pažnju.

Često se zaboravlja da su modeli samo pojednostavljeni mehanizmi reprezentacije daleko kompleksnijih sistema, koji omogućavaju efikasnost i automatizam u procjeni, kroz sistemsku primjenu pravila. Problematika kompleksnosti projektantskog zadatka prenosi se i na problematiku kompjutacijskih modela, odnosno njihove predvidivosti u kontekstu ne samo nepredvidive okoline već i kompleksnosti koja se krije iza pojednostavljenih kompjutacijskih procedura. Kompleksni dinamički sistemi definirani kao sistemi na granici haosa i reda po klasičnim standardima, ne mogu biti određeni jednostavnim principima uređenosti koji omogućuju predvidivost budućeg ponašanja. Problem donošenja odluka u kompleksnim situacijama isključivo na osnovu racionalnih kompjutabilnih modela uz kreiranje mnoštva varijabilnih opcija, što je karakteristika racionaliziranog pristupa kompleksnosti, vodi ka sve većoj divergenciji. Za projektantsko odlučivanje najbitnija je konvergencija u smjeru svrshodnog i jedinstvenog rješenja.²²⁴

²²⁴ Harold, Nelson. Erik, Stolterman. Design Judgement: Decision-Making in the 'Real' World. Design Journal, Vol. 6. No.1. 2003. pp. 23-31.

Iako se u začetku razvoja kompjutacijskih informacijskih modela i vještačke inteligencije pažnja poklanjala samim programskim sistemima i razvoju njihovih strukturiranih jezika, novija istraživanja daju prednost kompleksnom pristupu, gdje uloga ljudskog faktora, inventivnosti i inteligencije postaje značajan faktor u interakciji sa kompjutacijskim sistemima.

Formalni modeli mogu biti posrednici ali nisu i isključivi nosioci konačnih rješenja zbog izuzetne kompleksnosti projektantskog zadatka. Projektovanje je i opisni i interpretativni proces. Neke lingvističke teorije bacaju novo svjetlo na tenzioni odnos deskripcije i interpretacije, strukture i forme, fiksno i dinamičkog, čiji balans rezultira smisлом.²²⁵ Kao i prirodni jezici, jezik arhitekture nije fiksno strukturiran, već je multivalentan, ambivalentan, a specifične interpretativne forme pojavljuju se u limitima globalnog konteksta i lokalnih ograničenja specifične situacije. Rješenja su unikatna i jedinstvena za određenu situaciju. Potenciran je dijalog modela i projektanta, u kome se rješenja stvaraju iz komplementarnih i često tenzionih odnosa.²²⁶

Značaj učenja i direktnog situacijskog iskustva naspram programirane reprezentacije sve više se uključuje i u sisteme vještačke inteligencije. Ljudska procjena koja se često pojednostavljenom naziva intuicijom, nadilazi racionalni formalizam, uključujući generalno pozadinsko znanje stečeno iskustvom, uz kreativnost i inteligenciju potrebnu za donošenje odluka u novim nepredvidivim situacijama.²²⁷

²²⁵ Lars, Löfgren. Unifying foundations - to be seen in the phenomenon of language. *Foundations of Science*, 9(2), 2004. pp.135-189.

²²⁶ Adrian, Snodgrass. Richard, Coyne. *Models, Metaphors and the Hermeneutics of Designing*. 1992. pp. 56-74.

²²⁷ Ibid. pp. 23-31.

6.5.5. Kompleksni nedeterminirani prostor arhitektonskih prostornih modela - arhitektura između geometrijske forme i algoritma

Proces projektovanja kroz digitalne informacijske modele ne reprezentira fizički objekt već apstrahovanu formu objekta u kontekstu konceptualnog projektnog prostora, koji je nelinearan, dinamički, otvoren, kompleksan. Iz njega se hijerarhijski diferenciranjem u specifičnu jedinstvenu situaciju model prevodi u stvarni prostor. Modeli nisu egzaktne kopije ili reprezentacije projektovanog objekta, već predstavljaju generativni potencijal operativnih procesa koji se prevode u posebne instance, materijalizaciju i implementaciju.²²⁸ Svaki model izdvaja samo određene aspekte, koji često mogu biti komplementarni i konfliktni.

Projektni modeli, bilo geometrijski ili kompjutacijski determinirani, kao generativna i formativna potencija prostora ne daju samo reprezentativnu sliku koja zadovoljava očekivanja mogućeg, već modeli postaju dinamički interaktivni, anticipacijom ne samo mogućeg potencijala faznog prostora definiranog određenim sistemom pravila, već otvarajući mogućnosti modeliranja nepredvidivog u okvirima zadanog fiksnog sistema pravila na koja se oslanjaju.

Veza geometrije i algoritamskih kompjutacijskih sistema informacijskog doba, postaje evidentna ne samo kao paralela u vidu formalnih procedura matematskog determinizma već i kao problematika odnosa racionalnih i iracionalnih odnosa geometrije koja je zamijenjena problemom kompjutacije i nekompjutabilnosti algoritamskih procesa.

²²⁸ Sabine, Ammon. The rise of imagery in the age of modeling, in Ammon, S. Capdevila-Werning. eds. *The Active Image: Architecture and Engineering in the Age of Modeling*. Springer, 2017. pp. 287-312.

Shvatanje klasične geometrije kao izvorišta "čiste" forme oslobođene slučajnosti i nedeterminirane kompleksnosti direktnе percepcije, usko je vezano i uz shvatanje digitalnih informacijskih kompjutacijskih sistema kao determiniranih procesa koji omogućavaju kontrolu i predvidivost, gdje algoritamski objekt zamjenjuje geometrijsku formu.

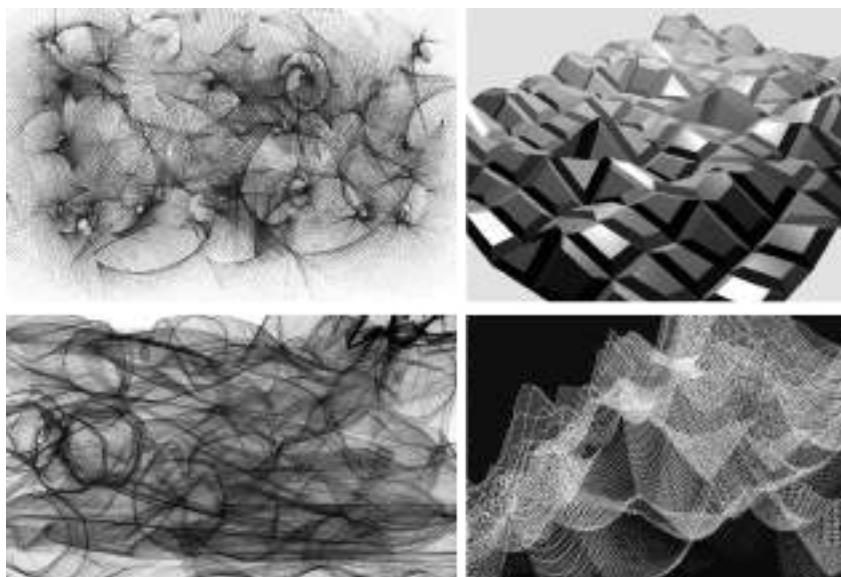
Još od razvoja geometrije kao formalnog sistema koji je isključivao ambivalentnost, nepredvidivost i različite smetnje u percepciji, tako je i digitalno procesiranje informacija naizgled uklonilo šum i smetnje u prenošenju informacija, digitalizacijom podataka u konačni broj diskretnih stanja pogodnih za registraciju i notaciju, prenošenje i kvantifikaciju. Unutar apstraktnih modela, moguće je otkriti zakonitosti koje u percipiranom prostoru nisu uočljive ili su nejasne, zbog preplitanja mnogih vanjskih utjecaja iz kompleksne okoline, kao perceptivnog "šuma" koji ometa jasnu, jednostavnu i jednoznačnu sliku.

Kroz problematiku modeliranja kompleksnih dinamičkih sistema, u algoritamski kompjutacijski prostor ušla je beskonačnost i iracionalnost u vidu nemogućnosti kompresije beskonačnog kvantiteta podataka u nešto jednostavnije, manje kompleksno. Problem nekompjutabilnosti u kompjutacijskim algoritmima, kojima se u prvom redu pripisivala preciznost i predvidivost formalnih procedura, postaje nezaobilazan aspekt informacijske tehnologije. Problem ne samo beskonačnog kvantiteta podataka već nedjeljivih podataka kao aspekta nekompjutabilnosti, postaje jednom od fundamentalnih tema novog postkibernetiskog doba. Pitanje beskonačnog umnožavanja podataka kao izraz nedjeljivosti odnosno nemogućnosti modeliranja kroz pojednostavljene modele neke kompleksne cjeline, postaje značajan problem formalnih kompjutacijskih sistema.²²⁹

²²⁹ Luciana, Parisi. *Contagious Architecture, Computation, Aesthetics, and Space*. MIT Press, 2013. pp. 41-43.

Kompleksnost je posljedica svodenja cjelovitog svijeta na jednostavne dijelove u interakciji, što dovodi do enormne količine informacija. Postojanje takvih formi koje predstavljaju beskonačnu količinu podataka, nastaje kao rezultat nedjeljivosti cjeline.²³⁰

Geometrija kojoj se pripisuje racionalnost i determinizam prostornih formi, uključuje iracionalnost još od otkrića zlatnog reza, odnosa stranica i dijagonale kvadrata ili obima i površine kružnice. Integracija geometrije i kompjutacijskih sistema, otkriva mogućnosti modeliranja i reprezentiranja iracionalne i kompleksne geometrijske forme, počevši od fraktalne geometrije, otkrivajući osnovnu kvalitetu iracionalnog ne kao suprotstavljenog racionalnom, već kao suštinskog unutarnjeg domena racionalnog.

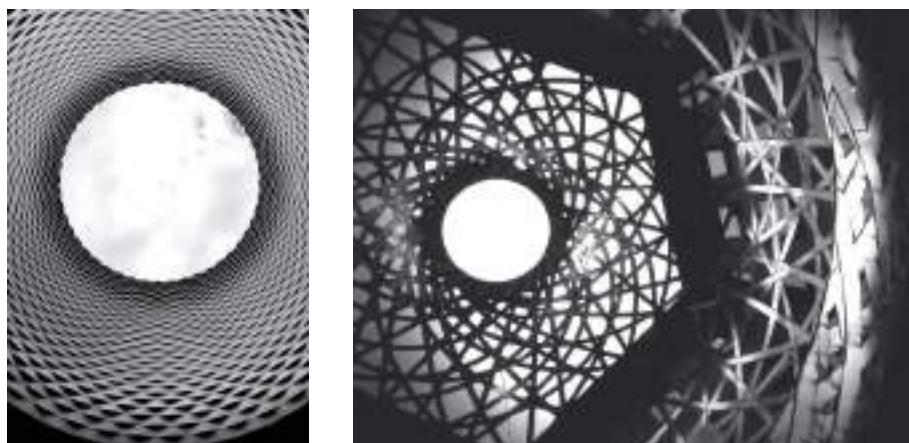


Slika 155.
Iracionalnost, beskonačnost
i neizmjjerljivost, povezuju
geometrijski i algoritamski
kompjutacijski prostor.

²³⁰Ibid. pp. 17-20.

Iracionalnost kao nemogućnost predstavljanja brojem, vezana je uz beskonačnost, koja predstavlja u kompjutacijskom smislu nemogućnost kompresije podataka u nešto manje kompleksno. Iracionalnost, beskonačnost i nemjerljivosti, posljedica su nedjeljivosti na dijelove koji bi kodirali ili izmjerili cjelinu, ne zbog njene veličine već njene kompleksnosti kao mrežne prepletenosti višeslojnih prostorno-vremenskih hijerarhija.

Kompleksni apstraktni modeli inkorporiraju i nepredvidive parametre, povećavajući nivo kompleksnosti. Neartikulirani, nepredvidivi parametri kao aspekt iracionalnog i nekompjutabilnog domena kompleksnosti, mogu postati osnova kreativnog inovativnog razvoja koji omogućavaju apstraktni kompleksni sistemi. Racionalizacija i imaginacija, kvantifikacija i kreacija, dopunjavaju se kroz formalne informacijske modele, omogućavajući inteligentni razvoj ljudske misli kroz aktivno dinamičko učešće u informacijskim procesima.



Slika 156.

Kreativni potencijal racionalnih i iracionalnih aspekata formalnih prostornih sistema.
Herzog & de Meuron; Izložbeni centar Messe Basel, 2013.; Fünf Höfe, München, 2003.

"Nekompjutabilni kvantiteti karakteriziraju postkibernetiske mehanizme anticipativne arhitekture, kulture programiranje podataka i gradbenih podatkovnih prostora."²³¹ "Algoritamska arhitektura" kao uža oznaka paradigme "digitalne arhitekture", nadilazi klasičnu kompoziciju cjeline od dijelova koji su podređeni cjelini. Algoritamski dizajn se susreće sa problemom beskonačnosti koja je inherentna kompjutacijskim procesima, čime se algoritamski bazirana arhitektura suočava sa nekompletnošću racionalnih logičkih sistema, jer je svaki objekt i diskretan i nedjeljiv, komponovan od beskonačno nebrojivih dijelova.²³²

Pohranjivanje i transmisija informacija podrazumijevaju dva kvalitativno različita procesa, jer uređeno stanje ne omogućava propagaciju informacije dok se u neuređenim stanjima propagacija informacija dešava prebrzo, pretvarajući informaciju u slučajni uzorak. Kompjutacijski procesi stoga funkcioniraju na rubnom području koje je karakteristika kompleksnih sistema, na rubu haosa i reda, iracionalnog i racionalnog, nekompjutabilnog i kompjutabilnog, nedeterminiranog i determiniranog. Najkompleksnija ponašanja dinamičkih sistema su u tranzicijskom području uređenog i neuređenog stanja, posjedujući i najveće kompjutacijske kapacitete transmisije, pohranjivanja i modifikacije informacije odnosno procesiranja informacije.²³³

Prostor u kome se odvija dinamika formalnih procesa, nije neutralna pozadina, već interaktivna dinamička struktura procesa koji emergiraju iz višestrukih diferenciranih prostorno-vremenskih dimenzija.

²³¹ Luciana, Parisi. *Contagious Architecture, Computation, Aesthetics, and Space*. MIT Press, 2013. p. 43.

²³² Ibid. 41-42.

²³³ Chris, Langton. *Computation at the Edge of Chaos. Phase transition and emergent computation*, *Physica, D* 42, 1990. pp. 12-37.

Dinamički procesi u naprednim kompjutacijskim sistemima uključuju diferenciranje i ponovno kreiranje i pozadine i modelirane forme kroz interaktivnost, adaptabilnost i učenje. Odnos forme i konteksta, predstavlja složeni odnos u kome se forma s jedne strane adaptira na kontekst a s druge strane ga prevazilazi i iz njega izdvaja. Neke tendencije u arhitekturi koje ističu značaj konteksta kao primarnog generatora forme, dajući prioritet fizičkim, ekonomskim ili tehničkim aspektima, zanemaruju suštinsku kvalitetu arhitekture koja po Hilliersu nadilazi naslijeđene strukture, svjesnim promišljanjem mijenjajući i transponujući rješenja iz prošlosti ka novoj realnosti.²³⁴

Prema Piconu²³⁵ arhitektonsko oblikovanje događa se na rubu neodređenosti, dopuštajući različite putanje pa je arhitektonska kreacija i njena reprezentacija smještena između dvije suprotne tendencije, tendencije ka redu, ali i ka transgresiji pravila kao odstupanjima koja omogućavaju diferenciranje i kvalitetu dizajna.

U periodu kada se arhitektura nalazi u ključnom tranzicijskom periodu prelaska na nove sisteme kodifikacije i nove prostorne modele koje donosi informacijska tehnologija i digitalizacija procesa projektovanja u svim fazama, potrebno je definirati nove konceptualne okvire koji nadilaze ustaljene obrasce i metodologije, razvojem novih, kompleksnijih prostornih koncepcija, koje neće biti samo programatske ili ekonomske već uključuju materijalnu i socijalnu dimenziju prostora.²³⁶

²³⁴ Bill, Hillier. Space is the Machine: A configurational theory of architecture. Space Syntax, London, 2007. pp. 33-34.

²³⁵ Antoine, Picon. Architecture and the virtual, Towards a New Materiality. Thesis, 2003. pp. 107-111.

²³⁶ A. Picon, Petit. E. L. Allais. The Ghost of Architecture: The Project and Its Codification. Perspecta, Vol. 35, Building Codes, 2004. pp. 8-19.



Slika 157.
Arhitektonsko oblikovanje na
rubu neodređenosti -
tendencija ka redu i ka
odstupanjima od pravila.

JDS/CEBRA:
Isbjerget, Aarhus, Danska,
2013.

Projektovanje obuhvata ne samo anticipaciju implementacije modela već i anticipaciju procesa modeliranja. Selekcija podataka koji su uključeni u model, njihovo kvalitativno i kvantitativno strukturiranje i organizacija, ključni su problem projektovanja. Arhitektonsko projektovanje kao prostorno modeliranje je i konstruktivan i deskriptivan proces, analitički i generativan, topološki i metrički, racionalan i iracionalan, formalan i intuitivan.

Arhitektura nije limitirana reduciranim mogućnostima novih prostornih iskustava kroz programabilne funkcije i unaprijed postavljene prostorne scenarije, već je otvorena prema iracionalnom, beskonačnom i nepredvidivom kao integralnim dijelom kompleksnog prostora vanjske sredine, uključujući ne samo prirodne i društvene već i formalne sisteme, odnosno geometrijske i kompjutacijske algoritamske sisteme savremenog informacijskog doba.

ZAKLJUČNO RAZMATRANJE

U začetku svog razvoja geometrijsko poimanje nastaje kao reduciranje kompleksnog iskustva svijeta na stabilne elemente i objekte, utvrđene jasnim granicama i jedinstvenom mjerom. U samoj osnovi geometrijskog prostornog poimanja javljaju se dvije naizgled suprotstavljene tendencije: jedinstvenost, ograničenost i distinkcija forme uz mnogostruktost, povezanost i neograničenost prostora.

Geometrija s jedne strane vodi i omogućava čitanje, prepoznavanje i kodiranje prostora kroz njegove oblike, a s druge transcendira vizualne oblike i njihovu materijaliziranu oblikovnu formu, obuhvatajući različite diskurse figuracije, konstrukcije i reprezentacije prostornih tijela kao mentalne slike. Geometrija se udaljavanjem od empirijskih obrazaca diže u sve više nivoje apstrakcije, da bi se u fizički svijet vratila otkrivajući njegovu sve bogatiju strukturu. Geometrija u apstrakciji traži kodove koji mogu opisati i reprezentirati, ali i kreirati sve veće bogatstvo fizičkih manifestacija.

Neponovljivost i haotičnost pojavnog prirodnog svijeta i njegovih oblika klasična geometrijska konceptualizacija zamjenjuje redom kao ponavljanjem, gdje je autonomija tijela zadržana kroz kretanje, u relaciji s vanjskim varijablama, održavajući balans, zatvorenost i značenje u odnosu na promjene okoline.

Geometrijsko tijelo je i individualizirano, odvojeno od pozadine, i dio kolektivnog jedinstva, bestjelesnog determinističkog sistema formi koji nadilazi i savladava organsku kompleksnost svijeta u apstraktnim relacijama.

Geometrijska konceptualizacija ocrtava kroz svoj razvoj kozmološku i filozofsku sliku svijeta određenih društvenih i vremenskih epoha, vezana kako uz racionalnu i logički utemeljenu naučnu sliku svijeta tako i uz duhovne, kulturne i socijalne aspekte društvenih procesa. Geometrijsko tijelo koje je u nekim periodima ljudske civilizacije smatrano savršenom manifestacijom idealnog ustrojstva svijeta, bazirano je na antropomorfnoj slici svijeta kojom je tijelo kao ograničena organska pojava dobilo razum, utemeljen u logičkim i racionalnim zakonima. Povezanost geometrije i transcendentnog ili geometrije i humanističkog pogleda na svijet, nije slučajna već leži u njenim suštinskim temeljima. Geometrija nije samo sistem koji definira apstraktne prostorne forme, njihovu mjeru i strukturu, već definira osnove individualnosti i jedinstva čovjeka kao racionalnog razumnog bića, dajući mu specifičan položaj u svijetu koji oblikuje i mijenja.

Klasične koncepcije geometrije usko su vezane i uz oblast arhitekture, dajući arhitektonskom objektu determiniranost, stabilnost i red, tretirajući ga kao stabilno prostorno tijelo koje traje u vremenu. Mjera, proporcionalni sistemi i simetrija kao osnovni geometrijski sistemi reda i koherentnosti, primjenjuju se u klasičnom pristupu arhitektonskom planiranju i prostornoj organizaciji.

Mjerenje postaje najjednostavniji način da se cjelina zamijeni dijelom, omogućavajući kontrolu i predvidivost cjeline u dijelovima. Iako se principi mjerenja smatraju osnovnim izvorom geometrije, u klasičnoj grčkoj matematici geometrija je bila način da se izrazi i neizmjernost.

Neke vrijednosti koje se ne mogu izraziti brojem mogu se geometrijski definirati i reprezentirati, kao npr. odnos stranice i dijagonale kvadrata ili iracionalna proporcija zlatnog presjeka. Geometrija je posebna grana matematike koja omogućava premoščivanje između racionalnog i iracionalnog. Omogućavajući modeliranje, vizualizaciju i razumijevanje prostornih struktura koje se smatraju iracionalnim i haotičnim, u novim matematičkim poljima, kao što je fraktalna geometrija, geometrija postaje usko vezana za teoriju kompleksnih sistema razvijajući se u nova područja kroz dinamičke informacijski determinirane modele.

Pod pojmom nauke o kompleksnosti različita područja se ujedinjuju u proučavanju sistema koji su otvoreni, dinamični i koji se ne mogu modelirati klasičnim determiniranim modelima. Sistemi koji su na ivici haosa i reda po klasičnim standardima, ne mogu biti modelirani jednostavnim principima reda koji omogućavaju predvidivost budućeg ponašanja.

Uključivanje kompleksne dinamike u okviru geometrijskog modeliranja, kroz razvoj novih oblasti geometrije i nove metode njihove reprezentacije i interpretacije, kodifikacije i vizualizacije, koje prate razvoj savremene računarske informacijske tehnologije, omogućava proširenje geometrijskih modela koji postaju sve više integrисани u materijalni svijet koji s druge strane postaje sve više artificijelan i geometriziran.

Fraktalne geometrijske strukture, parametarski geometrijski modeli i kompjutacijske informacijske strukture omogućavaju i vizualno-grafički prezentabilno modeliranje otvorenih, kompleksnih prostornih sistema i njihove strukture koja se odražava kroz razvojnu dinamiku, interakcije, varijabilne konfiguracije i dinamičke promjene stabilnosti i kontinuiteta.

Hijerarhijska struktura kompleksnosti i određen kontinuitet uprkos nelinearnom razvoju kompleksnih dinamičkih sistema, vodi ka emergenciji kao nepredvidivim novim vidovima organizacije i konfiguracije prostornih formi. Kompleksnost je kvalitet koji nije jednoznačno usmjeren, već se odnosi na dvostruko prepletene procese emergencije forme od jednostavnog ka složenom i od složenog ka jednostavnom, od dijela ka cjelini i od cjeline ka dijelovima.

Na koji način se odvija proces emergencije koji povezuje individualne dijelove u cjeline, i na koji način opis cjeline može sadržavati opise dijelova koji su takođe kompleksne cjeline, da li je cjelina više ili manje od sume dijelova koji su takođe kompleksne cjeline - pitanja su koja su u arhitekturi aktualna ne samo kroz nove kompjutabilne modele bazirane na dinamici kompleksnih sistema, već prožimaju arhitekturu kao njena suštinska pitanja.

Geometrija u arhitekturi nije više tretirana samo kao sistem zakona koji definira idealizirane prostorne forme, njihovu mjeru i reprezentacijske aspekte, već kao konceptualni sistem koji omogućava uslove poimanja, definiranja i generiranja prostornih formi i oblika. Umjesto geometrijskog idealizma i racionalizma, geometrijska forma emergira iz sistema simboličkih relacija, kao efekt ne samo njihovih strukturnih zakona već i ljudskih anticipacija i afektivnih projekcija.

Geometrijsko koncipiranje i modeliranje prostornih formi postaje osnovom savladavanja prostornih problema i kreiranja novih prostornih odnosa u kompleksnom prirodnom kontekstu koji je sve više integriran sa artificijelnim strukturama formalnih sistema koji i sami postaju sve kompleksniji.

Kroz različite modele, uzimajući u obzir kompleksnost i kao rezultat pojednostavljenog i apstrahovanog modeliranja stvarnosti, moguće je dobiti približne prikaze određenih aspekata koji nisu samo neutralno svojstvo prezentiranih fenomena, već i svojstvo samih modela koji postaju nerazdvojni od modeliranih objekata i procesa. Kompleksnost kao paradigma koja se sve više prihvata kao temeljni okvir naučnih i praktičnih problema, nadilazi klasične apstraktne linearne modele, kao posljedica prepleteneosti različitih prostornih dinamičkih sistema na više različitih prostorno-vremenskih nivoa.

Pojam prostora, forme i geometrije je neraskidivo povezan s pojmom vremena kroz spoznaju dinamičkog karaktera prostornosti, iako se često distinkcijom materijalnog ili fizičkog i apstraktnog geometrijskog, odvajaju u dva domena forma i materija, prostor i vrijeme, oblik i kretanje. U savremenim kompleksnim geometrijskim koncepcijama trajno održive nisu ni idealna tijela ni njihove slike, već dinamička prostorno-vremenska morfogenetska polja koja omogućavaju formiranje i transformaciju slika i prostornih oblika.

Savremeni pogled na dinamiku vraća vrijeme u arhitektonsku formu, koja nije historicistička forma zamrznuta u nekom prostornom materijaliziranom obliku, već forma koja nadilazi prostorne okvire uključujući vrijeme kao integralni aspekt prostornosti, kroz transponovane transformacije kao inherentan potencijal nove forme. Arhitektonski prostor u savremenoj arhitekturi nije pasivni receptor formi izvana nametnutih iz idealiziranog apstraktnog prostora, već iskustveni prostor u kome se prožimaju aktualni fizički prostor i virtualne imaginativne matrice dinamičkih generativnih sila nastajanja i postajanja. Arhitektonska forma postaje nestabilna, disperzna, multiplicirana, otjelovljena u geometrijskoj matrici koja predstavlja informacijsku organizacijsku strukturu koja uslovjava i omogućava postanak, razvoj i rast prostornih formi.

Novi pristup prostoru u arhitekturi donosi višeslojno preplitanje koncepcija, modeliranje kroz višestruke modele, razrješavanje konfliktnih reprezentacija, mrežnu topologiju i emergentnu formu. Strukturiranjem informacija kroz različite modele koji stupaju u interakciju, forma nije opisana već generirana, emergentna i dinamična, nije savršena već kompleksna. Informativna forma nadilazi formalnost kao stabilnu statičnu organizaciju, kroz nelinearnu korelaciju i geometrijske zakonitosti koje prožimaju diferencirane stepene formiranja i de-formiranja, formacija i transformacija.

Topološki izraz forme kao generalni okvir diferencira se u sve detaljnije nivoe. Uvođenjem parametarskih limita stvara se forma kao konceptualni, strukturalni, sistemski izraz modeliranja, koje može biti reprezentirano grafički, lingvistički ili fizički. Forma i proces postaju ne opositi već aspekti procesa formiranja. Forma kao reprezentacija kompleksnih dinamičkih oblikovnih procesa postaje generator multivalentnog reprezentacijski diferenciranog modeliranja prostora. Nelinearna povezanost razlika umjesto konflikta suprotstavljenih reprezentacija, uz objedinjavanje mentalnih slika i apstraktne formalne strukturalizacije prostornog iskustva, prožima hijerarhijsku organizaciju koja nije zasnovana na isključivim odnosima negacije, subordinacije i generalizacije već transformacije, sinteze i generativne koordinacije.

Oslanjajući se na nove tehnologije, nove ideje i nove geometrijske koncepte, geometrijska racionalnost u arhitekturi više ne mora značiti predvidivost, statičnost i repetitivnu uniformnost, vezane uz klasično poimanje reda, već igru nepredvidivosti i varijabilne transformabilnosti kompleksne geometrije.

Racionalnost s jedne strane predstavlja traženje sigurne predvidive pozadine, koja nepoznati svijet pretvara u poznatu okolinu koja postaje dom čovjeku izloženom nepredvidivim haotičnim silama eksternih procesa. S druge strane racionalnost, koja je neraskidivo vezana za svoju iracionalnu dimenziju, omogućila je i nezavisnost od okoline kada je suviše predvidiva i ponavljača, pretvarajući svaki racionalni sistem u kompleksan dinamički informacijski sistem, u kome su forma i transformacija, prostor i vrijeme nerazdvojno povezani u dinamički razvojni evolutivni sistem.

Digitalizacija savremene arhitektonske forme ne znači samo primjenu računarski definirane geometrijske reprezentacije forme, već otvara mogućnosti složenije, dinamičnije prostorne konceptualizacije i modeliranja. Geometrijski koncepti povezuju teoretske i praktične aspekte arhitektonskog projektovanja, uključujući napredne kompjutacijske tehnike i tehnologiju, kroz nova područja geometrije koja predstavljaju modele kompleksnih dinamičkih prostornih sistema.

Geometrijska prostorna apstrakcija i konceptualizacija nije vezana isključivo za determinističke formalne metode projektovanja, već i sa subjektivnim, intuitivnim iskustvom prostora, obuhvatajući kompleksna dinamička svojstva njegovog formiranja i transformacije. Time postaje moguća sinteza intuitivnih i kreativnih mentalnih procesa sa geometrijskim informacijskim limitima kojim sužavamo beskonačan prostor dajući mu sistemsku strukturu.

Geometrija je u arhitekturi sintetizirana sa socijalnim oblicima komunikacije kroz transformaciju jezika geometrije u jezik tehničkog crteža, koji kao operativni sistem geometriju postavlja u pozadinu. Ova pozadina postaje diferencirajući medij kao domena potencijala operacija u prednjem planu. Dinamika korelacije i interaktivnog odnosa različitih informacijskih organizacionih nivoa, postaje generator kompleksnih kreativnih procesa.

Da bi geometrijska pozadina bila dio kreativnog procesa koji omogućava stvaranje novoga, ona mora biti interaktivna i dinamična, ne predstavljajući fiksan okvir i rigidnu strukturu već adaptabilan otvoreni evolutivni potencijal. Geometrija shvaćena kao dublja generativna gramatika prostornog jezika, postaje otvorena produktivna baza programabilnih interaktivnih formi, koja povezuje konačne materijalizirane objekte sa beskonačnim, neograničenim aspektima prostora, postajući izvorom kreativnih rješenja.

Obuhvatajući konačno i beskonačno, racionalno i iracionalno, geometrija stvara vezu između materijalnog i apstraktnog, memorije prošlosti i anticipacije budućnosti. Svrha arhitektonskog objekta nije samo izolovanje ili adaptacija u odnosu na procese okoline, već transformacija okoline, društva i kulturne sredine, u cilju stvaranja dinamičnog interaktivnog prostora koji integriše i uvezuje u cjelinu egzistencije i ljudskih jedinki i artificijelnih objekata. Arhitektura kao djelatnost usmjerena ka kreiranju nove budućnosti u geometriji otkriva uvijek nove beskonačne horizonte koji vode ka novim idejama.

COMPLEX GEOMETRIC SPATIAL CONCEPTS IN ARCHITECTURE

SUMMARY

At the beginning of its development, the geometric conception emerges as a reduction of the complex experience of the world towards stable elements and objects, established by clear boundaries and a unique measure. At the very basis of the geometric spatial conception, two seemingly opposing tendencies appear: uniqueness, limitation and distinction of the form, with multiplicity, connectivity and infinity of space.

Geometry on the one hand guides and enables reading, recognition and coding of space through its forms and on the other hand, transcends visual forms and their materialized shapes, encompassing various discourses of figuration, construction and representation of spatial bodies as mental images. Geometry, moving away from empirical patterns, each time rises to the higher levels of abstraction, in order to return to the physical world revealing its increasingly rich structures. In abstraction geometry is searching for codes that can describe, represent, also creating an increasing wealth of physical manifestations.

The uniqueness and chaos of the emerging natural world and its forms is replaced by classical geometric conceptualization with order and repetition, where the autonomy of the body is maintained through movement, in relation to external variables, maintaining balance, closure and meaning concerning environmental changes.

The geometric body is both individualized, separated from the background, and part of collective unity, a disembodied deterministic system of forms that transcends and overcomes the organic complexity of the world in abstract relations.

Through its development, geometric conceptualization outlines the cosmological and philosophical picture of the world of certain social and temporal epochs, related to the rational and logically based scientific picture of the world as well as to the spiritual, cultural and social aspects of human collective processes. The geometric body, which in some periods of human civilization was considered a perfect manifestation of the ideal structure of the world, is based on the anthropomorphic picture of the world by which the body as a limited organic phenomenon obtained reason, grounded in logical and rational laws. The connection between geometry and the transcendent or geometry and the humanistic view of the world is not accidental but lies in its essential foundations. Geometry is not only a system that defines abstract spatial forms, their measure and structure, but defines the foundations of individuality and unity of man as a rational conscious being, giving him a specific position in the world that he shapes and changes.

Classical conceptions of geometry are closely related to the field of architecture, giving the architectural object determination, stability and order, treating it as a stable spatial body that lasts in time. Measure, proportional systems and symmetry as basic geometric systems of order and coherence, are applied in the classical approach to architectural planning and spatial organization.

Measurement becomes the simplest way to replace a whole with a part, allowing control and predictability of the whole by parts. Although the principles of measurement are considered as the basic source of geometry, in classical Greek mathematics geometry was a way to express immeasurability as well. Some values that cannot be expressed by a number can be geometrically defined and represented, such as the ratio of the side to the diagonal of a square or the irrational proportion of a golden section. Geometry is a special branch of mathematics that provides a bridge between the rational and the irrational. By enabling modeling, visualization, and understanding of spatial structures considered irrational and chaotic, in new mathematical fields such as fractal geometry, geometry becomes closely related to complex systems theory, evolving into new areas through dynamic information-based models.

Under the notion of the science of complexity, different fields are united in the study of systems that are open, dynamic and that cannot be modeled by classical deterministic models. Systems that are on the edge of chaos and order by classical standards cannot be covered by simple principles of order that allow for predictability of future behavior.

The introduction of complex dynamics within geometric modeling, through the development of new areas of geometry and new methods of their representation and interpretation, codification and visualization, which accompany the development of modern computational information technology, allows the expansion of geometric models that become increasingly integrated into the material world, that on the other side becomes increasingly artificial and geometrized.

Fractal geometric structures, parametric geometric models and computational information structures enable visual graphically presentable modeling of open, complex spatial systems and their structure, which is reflected through developmental dynamics, interactions, variable configurations and dynamic changes in stability and continuity.

Hierarchical structural complexity and a certain continuity, despite the nonlinear development, leads to the emergence, as unpredictable new types of organization and configuration of spatial forms. Complexity is a quality that is not unambiguously directed, but refers to doubly intertwined processes of form emergence from simple to complex and from complex to simple, from part to whole and from whole to parts.

How the emergent process that connects individual parts in to wholes takes place, and how the description of a whole can contain descriptions of parts that are also complex wholes, whether the whole is more or less than the sum of parts that are also complex wholes - are the questions of architecture, present not only through new computational models based on the dynamics of complex systems, but they permeate architecture as its essential issues.

Geometry in architecture is no longer treated only as a system of laws that define idealized spatial forms, their measure and representational aspects, but as a conceptual system that enables the conditions of understanding, defining and generating spatial forms and shapes. Instead of geometric idealism and rationalism, geometric form emerges from a system of symbolic relations, as an effect not only of their structural laws but also of human anticipations and affective projections.

Geometric conception and modeling of spatial forms are becoming the basis for overcoming spatial problems and creating new spatial relationships in a natural context that is increasingly integrated with the artificial structures of formal systems, that are becoming increasingly complex.

Through different models, taking into account the complexity as a result of simplified and abstracted modeling of reality, it is possible to obtain approximate representations of certain aspects that are not only a neutral property of the presented phenomena but also the property of the models themselves that become inseparable from modeled objects and processes. Complexity as a paradigm that is increasingly accepted as a fundamental framework of scientific and practical problems, transcends classical abstract linear models, as a consequence of the intertwining of different spatial dynamical systems at several different spatiotemporal levels.

The notion of space, form and geometry is inextricably linked with the notion of time through the cognition of the dynamic character of spatiality, although often the distinction of material or physical and abstract geometric, separates into two domains form and matter, space and time, form and motion. In modern complex geometric concepts, morphogenetic fields that enable the formation and transformation of images and spatial shapes are permanent, instead of the ideal bodies or their images.

The contemporary view of dynamics returns time to an architectural form, which is not a historicized form frozen in some spatial materialized shape, but a form that transcends spatial frameworks including time as an integral aspect of spatiality, through transposed transformations as an inherent potential of a new form.

Architectural space in contemporary architecture is not a passive receptor of forms imposed from outside from an idealized abstract space, but an experiential space in which the actual physical space and virtual imaginative matrices of dynamic forces of creation and becoming are mutually permeated. The architectural form becomes unstable, dispersed, multiplied, embodied in a geometric matrix as an information organizational structure that conditions and enables the origin, development and growth of spatial forms.

The new approach to space in architecture brings a multi-level interweaving of concepts, modeling through multiple models, resolution of conflicting representations, network topology, and emergent form. By structuring information through different models that interact, the form is not described, but generated, emergent and dynamic, not perfect but complex. Informative form transcends formality as a stable static organization, through nonlinear correlation and geometric laws that permeate differentiated degrees of forming and deforming, formation and transformation.

The topological expression of the form as a general framework is differentiated into more and more detailed levels. The introduction of parametric limits creates the form as a conceptual, structural, systemic expression of modeling, which can be represented graphically, linguistically or physically. Form and process become not opposites, but aspects of the process of formation. Form as a representation of complex dynamic formative processes becomes a generator of multivalent representational differentiated modeling of space. The nonlinear connection of differences instead of conflicts of opposing representations, with the unification of mental images and abstract formal structuring of spatial experience, permeates a hierarchical organization that is not based on exclusive relations of negation, subordination and generalization but transformation, synthesis and generative coordination.

Relying on new technologies, new ideas and new geometric concepts, geometric rationality in architecture no longer has to mean predictability, static and repetitive uniformity, but a game of unpredictability and variable transformability of complex geometry. Rationality, on the one hand, is the search for a secure, predictable background, which transforms the unknown world into a familiar environment that becomes home to a man left to unpredictable chaotic external forces. On the other hand, rationality, which is inextricably linked to its irrational dimension, has enabled independence from the environment when it is too predictable and repetitive, turning any rational system into a complex dynamic information system, in which form and transformation, space and time are inextricably linked into a dynamic developmental evolutionary system.

Digitalization of modern architectural form does not only mean the application of computationally-defined geometric representation of form, but also opens up possibilities for more complex, dynamic spatial conceptualization and modeling. Geometric concepts connect theoretical and practical aspects of architectural design, including advanced computational techniques and technology, through new areas of geometry that represent models of complex dynamic spatial systems.

Geometric spatial abstraction and conceptualization is not related exclusively to deterministic formal design methods, but also to the subjective, intuitive experience of space, encompassing the complex dynamic properties of its formation and transformation. This makes it possible to synthesize intuitive and creative mental processes with geometric information limits by which we narrow the infinite space by giving it a systemic structure.

Geometry in architecture is synthesized with social forms of communication through the transformation of the language of geometry into the language of technical drawing, which as an operating system puts geometry in the background. This background becomes a domain of potential operational functions in the foreground. The dynamics of correlation and the interactive relationship of different informative organizational levels, becomes a generator of complex creative processes.

For the geometrical background to be part of a creative process that enables the creation of the new, it must be interactive and dynamic, not representing a fixed framework and a rigid structure but an adaptable open evolutionary potential. Geometry understood as a deeper generative grammar of the spatial language, becomes an open, productive base of programmable, interactive forms, connecting finite materialized objects with infinite, unlimited aspects of space, becoming a source of creative solutions.

Embracing the finite and the infinite, the rational and the irrational, geometry creates a connection between the material and the abstract, memory of the past and the anticipation of the future. The purpose of an architectural object is not only an isolation or adaptation related to environmental processes, but the transformation of environment, society and cultural conditions, in order to create a dynamic interactive space that correlates and integrates human beings and artificial objects. Architecture as an activity directed at creation of the new future, in geometry always reveals new infinite horizons that lead to new ideas.

POPIS I IZVORI ILUSTRACIJA

- Slika 1. Apstraktna konceptualizacija prostora u arhitektonskom nacrtu.
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fallingwaterfloorplan.jpg?uselang=hr> (15. 03. 2020.)
- Slika 2. Grafička ilustracija haotične dinamike fizikalnih sistema.
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Chaos_Theory_%26_Double_Pendulum_-_4.jpg
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lorenz_system_r28_s10_b2-6666.png (20. 08. 2019.)
- Slika 3. Kompleksnost prirodnog prostora.
Foto: B. Čahtarević
- Slika 4. Dinamički karakter percepcije i transformacije vizualnih oblika.
Autor, modeliranje i rendering Blender
- Slika 5. Apstraktne strukture u specifičnom prostornom poretku.
Autor (slika lijevo)
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Carbon_lattice_diamond.png (slika desno; 08. 2019.)
- Slika 6. Ilustracija geometrijskih zakonitosti Euklidske geometrije.
Autor
- Slika 7. Vizualizacija geometrijske forme zakrivljenih prostora u računarskoj grafici.
Autor, softver Apophysis, <https://sourceforge.net>
- Slika 8. Vizualizacija prostora fraktalne geometrije uz pomoć računarske grafike.
Autor, softver Sterlingware
- Slika 9. Konstruktivni i reprezentacijski aspekti geometrije.
Autor
- Slika 10. Geometrijski koncepti i simbolički jezik geometrije u umjetnosti.
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:El_Lissitzky_I84363.jpg
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:El_Lissitzky_-_Proun_99_-_1941.548_-_Yale_University_Art_Gallery.jpg. (15. 08. 2019.)
- Slika 11. Geometrijske figure i tijela kao otvorene i zatvorene prostorne konfiguracije geometrijskih elemenata euklidskog prostora.
Autor
- Slika 12. Pravilna geometrijska tijela.
Autor
- Slika 13. Jednakost površina geometrijskih figura: Knjiga I, Elementi, Euclid, Ilustracija prop. 35. i 37.
Autor

Slika 14. Proizvod dvije linearne veličine u klasičnoj Grčkoj geometriji.

Autor

Slika 15. Omjer dvije dužine a i b, kao rezultanta ponovljenog postupka traženja zajedničke razlike.

Autor

Slika 16. Geometrijska proporcija kao odnos stranica pravougaonika

Autor

Slika 17. Konstruktivni postupak određivanja geometrijske sredine dvije dužine.

Autor

Slika 18. Srednja geometrijska proporcija pravougaonika - kvadratura pravougaonika.

Autor

Slika 19. Geometrijska konstrukcija podjele duži u proporciji "Zlatnog reza".

Autor

Slika 20. Ilustracija proporcije u ekstremnom i srednjem presjeku "zlatnog reza", kao odnosa površine pravougaonika i kvadrata.

Autor

Slika 21. Konstrukcija pravougaonika čije su stranice u omjeru "zlatnog reza".

Autor

Slika 22. Aproximacija spirale u omjeru "zlatnog reza" : Fibonačijeva spirala i njena manifestacija u prirodnom svijetu kao Nautilus školjka.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fibonacci_spiral_2019.svg (20. 08. 2019.)

https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Golden_spirals#/media/File:Nautilus_Shell.jpg

Slika 23. Statične i dinamičke geometrijske forme.

Autor

Slika 24. Sunčani sat u Apolonovom hramu, Pompeji.

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Temple_of_Apollo_\(7238818732\)_détail.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Temple_of_Apollo_(7238818732)_détail.jpg) (14. 07. 2019.)

Slika 25. Geometrija dinamičke forme nastale kretanjem pravca po određenim zakonitostima.

Autor, Model i rendering Blender

Slika 26. Dinamički sistem proporcija primijenjen kroz više prostornih nivoa - fraktalna geometrijska struktura.

Autor, Model i rendering Blender

Slika 27. Geometrijske transformacije u ravni i kompozicija geometrijskih transformacija.

Autor

Slika 28. Refleksija geometrijske figure preko ose refleksije .

Autor

Slika 29. Kombinacija dvije refleksije.

Autor

Slika 30. Translacija kao produkt dvije refleksije.

Autor

Slika 31. Rotacija oko centra rotacije za određen ugao i rotacija za ugao 180° kao poluokret.

Autor

Slika 32. Klizna refleksija kao proizvod neparnog broja refleksija.

Autor

Slika 33. Transformacija sličnosti - homotetija.

Autor

Slika 34. Preslikavanje geometrijske figure sa centrom u tački (S).

Autor

Slika 35. Refleksivna sličnost i centralno-slična rotacija.

Autor

Slika 36. Afine transformacije.

Autor

Slika 37. Projektivitet proporcijskog odnosa korespondentnih tačaka na dvije prave.

Autor

Slika 38. Korespondencija stranica dva trougla u projektivnom odnosu.

Autor

Slika 39. Projektivne transformacije geometrijske forme.

Autor

Slika 40. Sferni model eliptičke geometrije.

Autor

Slika 41. Grafički interpretirani modeli hiperboličke geometrije.

Autor

Slika 42. Topološke karakteristike prostornih formi .

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Königsberg_graph.svg

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Icosahedron_graph.svg (05. 07. 2019.)

Slika 43. Topološka ekvivalencija geometrije prostornih objekata.

Autor

Slika 44. Topološke transformacije geometrijskih figura i tijela.

Autor

Slika 45. Moebiusova traka i Kleinovo tijelo.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Moebius_Surface_1_Display.png

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:KleinBottle-Figure8-01.png> (05. 07. 2019.)

Slika 46. Princip simetrije zastupljen u formiranju snježnih kristala.

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SnowflakesWilsonBentley.jpg> (15. 07. 2019.)

Slika 47. Osna simetrija.

Autor

Slika 48. Centralna (lijevo) i rotaciona simetrija.

Autor

Slika 49. Translatorna simetrija.

Autor

Slika 50. Klizna simetrija.

Autor

Slika 51. Figure nastale kombiniranjem različitih tipova simetrije.

Autor

Slika 52. Plošna ornamentalna simetrija.

Autor

Slika 53. Simetrične geometrijske bordure.

Autor

Slika 54. Plošna ornamentalna simetrija definirana dvodimenzionalnom mrežom.

Autor

Slika 55. Tipovi plošne ornamentalne simetrije.

<https://svndl.stanford.edu/symmetry>

Autor, preko <http://math.hws.edu/eck/js/symmetry/wallpaper.html> (08. 2019.)

Slika 56. Grupe simetrija trougla i kvadrata.

Autor

Slika 57. Polu-pravilne geometrijske teselacije ravnih.

<https://mathworld.wolfram.com/Tessellation.html> (08. 2019.)

Slika 58. Periodične, aperiodične i asimetrične teselacije.

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:RegularRhombs.svg>

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Penrose_Tiling_\(Rhombi\).svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Penrose_Tiling_(Rhombi).svg)

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Diagrama_de_Voronoi.png (08. 2019.)

Autor, softver Blender

Slika 59. Rotacijske ose simetrije i ravni refleksivne simetrije kocke.

Autor

Slika 60. Trodimenzionalna teselacija prostora kombiniranim poliedrima.

<https://commons.wikimedia.org/wiki/Tiling#/media/File:HC-J15.png>

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:HC_A1-A3-A4.png (08. 2019.)

Slika 61. Helikoidna simetrija kao rotirajuća translacija.

Autor

Slika 62. Spiralna simetrija.

Autor

Slika 63. Simetrija forme neeuklidske geometrije i fraktalna simetrija - samosličnost.

Autor

Slika 64. Ilustracija kompleksnih matematičkih funkcija savremene geometrije.

Autor, software Apophysis

Slika 65. Nelinearne strukture prirodnih geoloških formacija.

Autor, Google Maps

Slika 66. Vizualna kompleksnost prirodnih materijala i tekstura .

<https://pixabay.com/photos/sea-seascape-pebble-beach-coast-2308203/> (07. 2019.)

Slika 67. Perceptivni procesi strukturnih transformacija mogu biti reprezentirani novim dinamičkim geometrijskim modelima.

Autor, modelirano u Fractal subdivision applet

Slika 68. Turbulentna dinamika klimatskih procesa kao područje proučavanja teorije haosa.

NASA Earth Observatory, Jesse Allen, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kilo,_Ignacio_and_Jimena_2015-08-30_0930Z.jpg (07. 2019.)

Slika 69. Princip samoorganiziranja i emergencije - dinamika jata ptica.

<https://pixabay.com/photos/bird-birds-flock-of-birds-animal-290744/> (07. 2019.)

Slika 70. Vizualizacija kompleksnih geometrijskih struktura kroz različite informacijske modele.

Autor, modelirano u Fractal subdivision applet, Vectal, McCell

Slika 71. Hijerarhijski i granajući karakter prostornih formi kompleksnih sistema.

Autor, softver Apophysis

Slika 72. Razvojna dinamika kroz višestruko nivellirane transformacije forme .

Autor, softver Vectal

Slika 73. Fraktalna geometrijska forma.

Autor

Slika 74. Razvojne faze fraktalne forme - kvadrat i trougao Serpinskoga.

<https://mathworld.wolfram.com/SierpinskiCarpet.html>

<https://mathworld.wolfram.com/SierpinskiSieve.html> (07. 2019.)

Slika 75. Algebarske matematske fraktalne strukture kompleksne morfologije.

https://commons.wikimedia.org/wiki/Fractal#/media/File:Mandel_zoom_11_satellite_double_spiral.jpg

https://en.wikipedia.org/wiki/Mandelbrot_set#/media/File:Mandelbrot_set_image.png (07. 2019.)

Slika 76. Konstrukcija fraktalnih determinističkih figura kroz ponovljene transformacije.

https://hr.wikipedia.org/wiki/Kochova_krivilja; obrada Autor

https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Hexagonal_Koch_snowflakes (07. 2019.)

Slika 77. Konstrukcija fraktalne forme u faznim transformacijama : zmajolika kriva.

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dragon_curve_iterations_\(2\).svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dragon_curve_iterations_(2).svg)

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dragon_curve (07. 2019.)

Slika 78. Mengerova spužva.

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Menger.png> (07. 2019.)

Slika 79. Fraktalne samoslične forme nastale kao ishodi višestrukih transformacija-

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:The_circular_fractal_after_the_fifth_iteration.png (07. 2019.)

Autor, LSSketchbook, (sl. desno)

Slika 80. Povećanje mase ovisno o dvostrukom linearnom uvećanju klasičnih geometrijskih formi.

Autor

Slika 81. Fraktalna dimenzija trougla Serpinskoga

Autor

Slika 82. Fraktalna dimenzija fraktalnih geometrijskih formi .

https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_fractals_by_Hausdorff_dimension (07. 2019.)

Slika 83. Fraktalna dimenzija dobivena pomoću metoda broja celija.

<https://imagej.nih.gov/ij/plugins/fraclac/FLHelp/BoxCounting.htm> (obrada Autor, 07. 2019.)

Slika 84. Beskonačna skala uvećanja fraktalne geometrijske forme.

Obrada autor, fractal softver Chaos,

Slika 85. Prirodne forme koje pokazuju fraktalne karakteristike.

<https://pixabay.com/photos/green-leaf-nature-green-texture-2357404/>

<https://pixabay.com/photos/tree-silhouette-branches-tall-high-894903>

<https://pixabay.com/photos/flash-thunderstorm-super-cell-2568383/> (08. 2019.)

Slika 86. Prirodni pejzaž modeliran i vizualiziran putem algoritama baziranih na fraktalnoj geometriji.

Autor, softver Terragen, <https://planetside.co.uk>

Slika 87. Slikovni grafički prikaz procesa generiranja Kohove linije.

Autor

Slika 88. Forme strukturno analogue bilnjim oblicima generirane algoritamskim postupcima preko L-sistema.

Autor, preko online L-sistem generatora <http://piratefsh.github.io/p5js-art/public/lsystems/>

<http://www.kev3d.co.uk/dev/lsystems/> (08. 2019.)

Slika 89. Različiti morfološki oblici kompleksnih formi nastali postupkom uzastopnih transformacija inicijalne forme za isto pravilo produciranja i različite parametre ugla.

Autor, preko online L-sistem generatora <http://piratefsh.github.io/p5js-art/public/lsystems/>

Slika 90. Grafički prikaz dinamičkih uzoraka celularnih automata.

<https://mathworld.wolfram.com/CellularAutomaton.html> (08. 2019.)

Slika 91. Grafički prikaz četiri vrste dinamičkih procesa modeliranih pomoću celularnih automata.

Autor, softver McCell

Slika 92. Dinamički informacijski modeli bazirani na ponašanju apstraktnih autonomnih "agenata".

Obrada autor, NetLogo, <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/> (07. 2019.)

Slika 93. Kompleksni sistemi nastali koordiniranim sinhroniziranim djelovanjem većeg broja jedinki koje slijede jednostavna pravila.

Obrada autor, NetLogo, <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/> (07. 2019.)

Slika 94. Grafički prikaz dinamičkih samorazvojnih i evolucijskih procesa modeliranih pomoću apstraktnih informacijskih modela.

Obrada autor, NetLogo, <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/> (07. 2019.)

Slika 95. Reprezentacija transformabilnih varijacija i mutacija forme određenog genotipa u faznom prostoru, pomoću genetičkih algoritama.

Obrada autor

<https://gatc.ca/projects/biomorph-evolve/#Biomorph%20Evolve%20App>

Nichols, N. and Wilensky, U. (2006). NetLogo Sunflower Biomorphs model. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/SunflowerBiomorphs>. (08. 2019.)

Slika 96. Prostorne geometrijske forme kao slojevita konfiguracija sintetizirane prostorno-vremenske dimenzije.

Autor, softver Blender

Slika 97. Dinamička prostorno geometrijska forma kao rezultanta multipliciranih transformacija.

Autor, softver Blender

Slika 98. Diskontinuirana slika kompleksne geometrijske strukture kroz nivelirane faze razvoja.

Autor, LSSketchbook

Slika 99. Geometrijske forme u kompleksnom geometrijskom modelu baziranom na kontinuiranim transformacijama.

Autor, Blender

- Slika 100. Celularna reprezentacija digitalizirane geometrijske forme.
Obrada autor. <http://cubes.io> (08. 2019.)
- Slika 101. Dinamički prostor transformacijskog potencijala kompleksne otvorene forme
Obrada autor, Wilensky, U. (2007). NetLogo Urban Suite - Cells model. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/UrbanSuite-Cells>.
- Slika 102. Prostorne forme u arhitekturi bazirane na različitim geometrijskim konceptima i njihovim interpretacijama.
<https://pixabay.com/photos/chartres-cathedral-medieval-1021517/>
https://en.wikipedia.org/wiki/CLA_Building (08. 2019.)
- Slika 103. Dinamičke prostorne strukture obuhvataju višestruke sisteme reda i mjerne
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Paris_2016_\(30109877054\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Paris_2016_(30109877054).jpg)
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Paris_2019_\(45904395055\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Paris_2019_(45904395055).jpg) (08. 2019.)
- Slika 104. Konfiguracijski aspekti savremene arhitektonске forme oslonjeni na apstrakciju i geometrijsku konceptualizaciju.
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rem_Koolhaas_CCTV_building_\(6233587191\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rem_Koolhaas_CCTV_building_(6233587191).jpg)
<https://unsplash.com/photos/otf25n2UETg> (08. 2019.)
- Slika 105. Proporcionalni sistemi srednjovjekovne arhitekture bazirani na proporcijama kvadrata i trougla.
Skica Autor, crtež plana <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Salle.capitulaire.Villard.de.Honnecourt.png> (08. 2019.)
- Slika 106. Proporcija zlatnog reza u pentagonalnoj formi.
Skica Autor, crtež plana https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Farnese_Vignola.jpg
- Slika 107. Ritam i proporcija u arhitektonskoj prostornoj kompoziciji.
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:The_Parthenon_Athens.jpg (08. 2019.)
- Slika 108. Principi simetrije u arhitektonskim detaljima.
<https://pixabay.com/photos/paris-rosette-architecture-2128581/> (08. 2019.)
- Slika 109. Karakteristični ornamentalni uzorci.
https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Illustrations_by_Owen_Jones (08. 2019.)
- Slika 110. Ornamentirane površine kao rezultat složenih geometrijskih principa simetrije.
<https://pixabay.com/photos/alhambra-granada-andalusia-palace-1526432/> (08. 2019.)
- Slika 111. Različiti tipovi prostornih formi u arhitekturi uslovljeni su određenim kvalitetima geometrijskih konceptacija.
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Villard_de_Honnecourt_-_Sketchbook_-_29.jpg
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CLA_Building.JPG
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CPPCLABUILDING1.JPG> (08. 2019.)
- Slika 112. Prostorne forme Egipatske arhitekture.
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Philae_temple_at_night.jpg. (08. 2019.)
- Slika 113. Prostorne forme klasične Grčke arhitekture.
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:The_Temple_Erechtheion_at_Athens_-_Pococke_Richard_-1745.jpg (08. 2019.)
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Akropolis,_Erektheion,_kariatidák._Fortepan_56635.jpg

Slika 114. Prostorne forme klasične Rimske arhitekture.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dehio_1_Pantheon_Floor_plan.jpg

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rome-Pantheon.jpg> (08. 2019.)

Slika 115. Prostorne forme Bizantske arhitekture.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Emilia_Ravenna4_tango7174.jpg

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Jahrbuch_MZK_Band_03_-_Gew%C3%B6lbesystem_-_Fig_02_San_Vitale_zu_Ravenna.jpg (08. 2019.)

Slika 116. Karakteristične vizualne i strukturne forme gotičke arhitekture.

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Plan.cathedrale.Chartres.png>

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ChartresCathedral-WestFacade-high-res.jpg> (08. 2019.)

Slika 117. Kompleksnost strukturne i vizualne forme gotičke arhitekture.

https://en.wikipedia.org/wiki/Seville_Cathedral#/media/File:Sevilla_cathedral_-_vault.jpg (08. 2019.)

Slika 118. Prostorne geometrijske forme i ornamentalni uzorci islamske arhitekture.

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CrossPatheeDome.jpg>

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dome_of_the_Rock_\(Jerusalem\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dome_of_the_Rock_(Jerusalem).jpg) (08. 2019.)

Slika 119. Prostorne forme renesansne arhitekture definirane perspektivnom slikom.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fra_Carnevale_-_The_Ideal_City_-_Walters_37677.jpg

Slika 120. Prostorne forme barokne arhitekture : kupole.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Chapel_of_Holy_Shroud_Cupola.jpg (08. 2019.)

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:San_Carlo_alle_Quattro_Fontane_\(Rome\)_-_Dome.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:San_Carlo_alle_Quattro_Fontane_(Rome)_-_Dome.jpg)

Slika 121. Prostorna geometrija forme moderne arhitekture.

<https://commons.wikimedia.org/wiki/>

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mies_van_der_Rohe_photo_Farnsworth_House_Plano_USA_7.jpg

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Plan_-_Edith_Farnsworth_House,_14520_River_Road,_Plano,_Kendall_County,_IL_HABS_ILL47-PLAN.V1-_\(sheet_3_of_8\).tif](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Plan_-_Edith_Farnsworth_House,_14520_River_Road,_Plano,_Kendall_County,_IL_HABS_ILL47-PLAN.V1-_(sheet_3_of_8).tif) (08. 2019.)

Slika 122. Transformacija volumena u površine na simultano diferenciranim prostornim nivoima.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Theo_van_Doesburg_246.jpg (08. 2019.)

Slika 123. Arhitektonske forme kao statične geometrijske strukture.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Chicago_Federal_Center.jpg

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Villa_Rotonda_front.jpg (08. 2019.)

Slika 124. Dinamički kvalitet geometrijske forme zakriviljenih linija i površina.

<https://pixabay.com/photos/opera-house-sydney-australia-3410221/> (08. 2019.)

<https://www.records.nsw.gov.au/archives/magazine/galleries/sydney-opera-house-the-yellow-book>

Slika 125. Dinamički karakter dekonstrukcije geometrijske forme.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:3.Extension_of_Royal_Ontario_Museum_Toronto.jpg

Slika 126. Kompleksni geometrijski koncepti u arhitekturi aktualizirani razvojem računarskog informacijskog modeliranja.

<https://pixabay.com/photos/hungerburgbahn-track-innsbruck-tyrol-2224931/> (08. 2019.)

Slika 127. Racionalno geometrijski determinirane arhitektonske forme.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ledoux_Atelier_Haus_der_Kreise_Projekt.jpg (08. 2019.)

Slika 128. Iracionalne arhitektonske forme.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CasaBatllo_0170.JPG

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sagrada-familia-arches2.jpg> (08. 2019.)

Slika 129. Organska prostorna konцепција arhitektonske forme.

<https://unsplash.com/photos/GkCKVRU9Zkk> (10.10. 2019.)

Slika 130. Multivalentan izraz postmoderne arhitektonske forme.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Portland_Building_1982.grey.jpg

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:The_Portland_Building.jpg 08. 2019.)

Slika 131. Kontinuirane deformacije topološke geometrije rezultiraju kompleksnom arhitektonskom formom.

<https://pixabay.com/photos/walt-disney-center-concert-hall-hall-1629173/> (08. 2019.)

Slika 132. Vizualna forma fragmentirane strukture antičke arhitekture izložene vremenskim procesima.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Erechtheum_Acropolis_Athens_evening_moon.jpg

Slika 133. Izomorfnost prostorno-vremenskih i frakタルnih geometrijskih struktura.

<https://unsplash.com/photos/jr4P8lidGkM> (10.10. 2019.)

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dendrite_julia.png (08. 2019.)

Slika 134. Uloga prirodnih haotičnih tekstura u formiranju arhitektonskog prostora.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:DPAV_Barcelona.JPG (08. 2019.)

Slika 135. Kompleksna struktura urbanih prostornih formi.

Autor preko Arcgis, esri.com

Slika 136. Geometrija digitalizirane arhitektonske forme.

<https://unsplash.com/photos/hxhZMwfIgdQ>

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Panorama_-_Außen_2.jpg (08. 2019.)

Slika 137. Savijanje, deformacija i mrežna determinacija kao karakteristike "digitalne" arhitektonske forme.

Autor, softver Blender

Slika 138. Prostorna forma kao produkt informacijskih i fizičkih procesa.

Autor, Blender

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Waterloo_ontario_perimeter_institute.jpg (09. 2019.)

Slika 139. Otvorena topološka digitalizirana forma.

<https://eisenmanarchitects.com> (09. 2019.)

Slika 140. Arhitektonska forma definirana kroz nelinearnu umreženu strukturu.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dongdaemun_Design_Plaza_Side.jpg (09. 2019.)

Slika 141. Emergencija kompleksne arhitektonske forme iz jedinstva pravilnosti i nepravilnosti, sličnosti i razlike.

<https://unsplash.com/photos/izC9Yob6DGM> (09. 2019.)

Slika 142. Strukturalistički zasnovane arhitektonske forme..

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Orphanage-1a.Aldo_van_Eyck.jpg (09. 2019.)

Slika 143. Osnovni principi formiranja složenih prostornih sistema.

Autor, Blender

Slika 144. Višeslojna modulacija nelinearne forme kompleksnog karaktera

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:79%26Park,_2019_\(DSCN5488\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:79%26Park,_2019_(DSCN5488).jpg) (09. 2019.)

Slika 145. Evolutivna forma kao rezultanta definiranih parametara generativnog programskog sistema.

<https://pixabay.com/photos/architecture-modern-seville-spain-754964/> (09. 2019.)

- Slika 146. Modularni principi organizacije prostornih sistema bazirani na internoj digitalizaciji forme.
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Serpentine_Pavilion_2016_L_\(27776972542\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Serpentine_Pavilion_2016_L_(27776972542).jpg) (09. 2019.)
- Slika 147. Dinamika mutacija, varijacija i naslijeda uz mogućnosti selekcije, kao produkt genetičkih algoritama.
Autor, Genetic images applet
- Slika 148. Heterogene kompleksne geometrijske strukture - Voronoi geometrijski diagram.
Autor, Blender
- Slika 149. Arhitektonski objekti kao kompleksne modularne strukture generirane iz adaptabilnih varijabilnih jedinica.
<https://unsplash.com/photos/LkRCYc2DU68> (20.12. 2019.)
https://en.wikipedia.org/wiki/File:Tetris_apartments_01.jpg (12. 2019.)
- Slika 150. Parametarsko modeliranje forme koja postaje fazno područje mogućih stanja procesa transformacije.
Autor, Blender
- Slika 151. Vizualno programiranje kao metoda računarskog geometrijskog modeliranja.
<http://blog.rhino3d.com/2013/05/new-release-of-panelingtools-for-rhino.html> (09. 2019.)
- Slika 152. Parametarski strukturalno generirana arhitektonska forma kroz otvoreni programatski model.
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Beijing_national_stadium.jpg (09. 2019.)
- Slika 153. BIM modeli objedinjavaju heterogene reprezentacije u jedinstven 3d model.
<https://www.autodesk.com/products/revit/features?plc=RVT&term=1-YEAR&support=ADVANCED&quantity=1>
- Slika 154. Kompjutacijski način projektovanja koristi digitalne modele povezane sa robotskim mašinama koje izvode proces produkcije.
<https://www.dezeen.com/2014/06/26/icd-itke-pavilion-beetle-shells-university-of-stuttgart/> (09. 2019)
- Slika 155. Iracionalnost beskonačnost i neizmjerljivost, povezuju geometrijski i algoritamski kompjutacijski prostor.
Autor, softver Processing i Blender
- Slika 156. Kreativni potencijal racionalnih i iracionalnih aspekata formalnih prostornih sistema.
<https://unsplash.com/photos/OzK7tlOPggk> (09. 2019)
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:München_\(9762099136\).jpg?uselang=hr](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:München_(9762099136).jpg?uselang=hr)
Obrada Autor
- Slika 157. Arhitektonsko oblikovanje na rubu neodređenosti - tendencija ka redu i ka odstupanjima od pravila.
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ilsbjerget_2_2014-09-23.jpg (09. 2019)

LITERATURA

- Adams, W. M. *Future nature*. Earthscan publications, London, 1966.
- Argan, G. Carlo. *Arhitektura i kultura*. Logos, Split, 1989.
- Aish, Robert i Bradella, N. The Evolution of Architectural Computing: From Building Modeling to Design Computation, *Architectural Research Quarterly*, vol 21(01), 2017. pp. 65-73.
- Allen, Peter. Cities: The Visible Expression of Co-evolving Complexity. u Ekim, T. Egbert, S. Han, M. Portugali J. eds. *Complexity Theories of Cities Have Come of Age*. Springer, Heidelberg, 2012. pp. 67 - 89.
- Ammon, Sabine. The rise of imagery in the age of modeling. u Ammon, S. Capdevila-Werning, R. eds., *The Active Image: Architecture and Engineering in the Age of Modeling*. Springer, London 2017. pp. 287-312.
- Aristotle. *The Categories*. Translator: E. M. Edghill, The Project Gutenberg EBook, 2000.
<https://www.gutenberg.org/files/2412/2412-h/2412-h.htm> (Pristup 09. 08. 2018.)
- Ashby, W. Ross. Principles of the self-organizing system. u H. Von Foerster. G. W. Zopf. Jr. eds., *Principles of Self-Organization: Transactions of the University of Illinois Symposium*, Pergamon Press, London, 1962. pp. 255-278.
- Arnheim, Rudolf. *The dynamics of architectural form*. University of California press, London, 1977.
- Arnheim, Rudolf. *Umetnost i vizualno opažanje*. Univerzitet umetnosti, Beograd, 1987.
- Banham, Reyner. *Theory and design in the first machine age*. Architectural press, London, 1977.
- Barker, Stefan. *Filozofija matematike*. Nolit, Beograd, 1973.
- Barnsley, Michael. *Fractals Everywhere*. Academic Press, New York, 1993.
- Bašlar, Gaston. *Novi naučni duh*. Izdavačka Knjižara Zorana Stojanovića, Novi Sad, 1991.

- Batty, Michael i Longley, Paul. *Fractal Cities: A Geometry of Form and Function*. Academic Press, London. 1994.
- Batty, Michael. *Cities and Complexity: Understanding Cities through Cellular Automata, Agent-Based Models, and Fractals*. MIT Press, Cambridge, 2005.
- Bennett, Jane. *Vibrant Matter: a Political Ecology of Things*. Duke University Press, Durham and London, 2010.
- Blasius, Bernd, Gross, Thilo. Dynamic and Topological Interplay in Adaptive Networks, u ed. Schuster, Heinz Georg, *Reviews of Nonlinear Dynamics and Complexity*. vol. 2, Wiley-VCH, Verlag, 2009. pp. 63 - 106.
- Bohm, David. *Wholeness and the Implicate Order*. Routledge, London, New York, 1980.
- Brolin, Brent C. *Arhitektura u kontekstu*. Građevinska knjiga, Beograd, 1988.
- Bellant, Conrad. *Computers and Chaos*. Sigma press, Chesire, 1992.
- Bunde, Armin i Havlin, Shlomo. *Fractals in science*. Springer-Verlag, Berlin, 1994.
- Bourbaki, N. (autori), The Architecture of mathematics. *The American Mathematical Monthly*, Vol. 57. No. 4. 1950. pp. 221-232.
- Capra, Fritjof. *Vrijeme preokreta*. Globus, Zagreb, 1986.
- Carpo, Mario. *The alphabet and the algorithm*. MIT Press, Cambridge, London, 2011.
- Cross, Nigel. *Engineering Design Methods: strategies for product design*. John Wiley and Sons Ltd. Chichester, 2008.
- Čahtarević, Rada. Univerzalnost kompleksnosti: od geometrijskoga prostornog koncepta modernizma do suvremene arhitektonske forme. *Prostor, znanstveni časopis za arhitekturu i urbanizam*, 1[35] 16. Arhitektonski fakultet, Zagreb, 2008. pp. 64 -75.
- Čahtarević, Rada. Fraktalne geometrijske strukture u arhitekturi: fraktalni geometrijski model primijenjen u grafičkoj interpretaciji koncepta arhitektonskog prostora kao kompleksnog dinamičkog sistema. Doktorska disertacija, Arhitektonski fakultet Sarajevo, Sarajevo, 2002.
- Čahtarević, Rada. Geometrijska determinacija organske forme u arhitekturi. (1; 2), *AGD profi*, časopis za arhitekturu, gradnju i dizajn BiH, br. 22; 23, Pergola, Sarajevo, 2007. pp. 64 - 71, 54 - 60.
- Čahtarević, Rada. Arhitektonska forma kao igra kompleksne modularne geometrije. Geometrija savremene arhitektonske forme 3. *AGD profi*, časopis za arhitekturu, gradnju i dizajn BiH, br. 29. Pergola, Sarajevo, 2008.

- Da Landa, Manuel. *Intensive Science and Virtual Philosophy*. Continuum, London, New York, 2002.
- Dawkins, Richard. *The Blind Watchmaker*. W.W. Norton & Co. New York, 1996.
- Devide, Vladimir. *Matematika kroz kulture i epohe*. Školska knjiga, Zagreb, 1979.
- Devlin, Keith. *Nova zlata doba matematike*. Društvo matematikov, fizikov in astronomov, Ljubljana, 1993.
- Dorfles, Đilo. *Pohvala Disharmoniji*, Svetovi, Novi Sad, 1991.
- Dunham, Judith. Zimmerman, Scot. *Details of Frank Lloyd Wright*. Thames and Hudson, London, 1994.
- Dženks, Čarls. *Moderno pokreti u arhitekturi*. Građ. Knjiga, Beograd, 1988.
- Eko, Umberto. *Estetika i teorija informacije*, Prosvjeta, Beograd, 1977.
- Euklid, Bilimović, A. *Euklidovi elementi*. Naučna knjiga, Beograd, 1949.
- Fetisov, A. I. *O Euklidskoj i neeuclidiskim geometrijama*. Školska knjiga, Zagreb, 1981.
- Field, Michael i Golybitsky, Martin. *Symmetry in chaos: a search for pattern in mathematics, art, and nature*. Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM) , Philadelphia, 2009.
- Fosijon, Anri. *Život oblika*. Kultura, Beograd, 1964.
- Frazer, John. *Evolutionary architecture*. Architectural Association, London, 1995.
- Fromm, Jochen. *The Emergence of Complexity*. Kassel University Press, Kassel, 2004.
- Ghyka, Matila. *The Geometry of Art and Life*. Dover Publications, New York, 1977.
- Gibson, James J. *The Perception of the Visual World*. The riverside press, Cambridge, 1950.
- Gibson, James J. *The Ecological Approach to Visual Perception*. Psychology Press, Taylor & Francis Group, New York, 1986.
- Giedion, Sigfried. *Space, Time, and Architecture: the growth of the new tradition*. Harvard University Press, Cambridge, 1959.
- Gombrich, Ernest. *The Sense of Order*. Phaidon, Oxford, 1979.
- Gombrich, Ernest. *Umetnost i iluzija: Psihologija slikovnog predstavljanja*. Nolit, Beograd, 1984.
- Goodman, Cyntia. *Digital visions: Computers and art*. Harry N. Abrams, New York, 1987.
- Greenberg, Marvin J. *Euclidean and non-Euclidean geometries: development and history*. W. H. Freeman and Company, New York, 1994.

- Heilbron, J. L. *Geometry Civilized: History, culture and technique*. Oxford University Press, New York, 1998.
- Heylighen, Francis. The Science Of Self-Organization And Adaptivity, u Kiel. L. D. ed. *Knowledge Management, Organizational Intelligence and Learning, and Complexity*: v. 3, EOLSS Publishers, 2002.
- Heylighen, Francis. Self-Organization, Emergence and the Architecture of Complexity. u *Proceedings of the 1st European Conference on System Science*, AFCET, 1989.
- Heynen, Hilde. *Architecture and modernity: a critique*. MIT Press, Cambridge, 1999.
- Hilbert, David. *Foundations of Geometry*. The Open Court Publishing Company, La Salle, 1950.
- Hillier, Bill. *Space is the Machine: A configurational theory of architecture*. Space Syntax, London, 2007.
- Holzer, Dominik. BIM's Seven Deadly Sins. *International Journal of Architectural Computing* 9(4). 2011.
- Jeger, Max. *Transformation Geometry*. George Allen & Unwin, London, 1966.
- Jencks, Charles. *The Architecture of the Jumping Universe: A Polemic: How Complexity Science is Changing Architecture and Culture*. Academy Editions, Wiley, London, 1997.
- Johnson, Philip, Wigley, Mark. *Deconstructivist architecture*. The Museum of Modern Art, New York, 1988.
- Jones, Owen. *The Grammar of Ornament*. Dorling Kindersley Book, London, 2001.
- Kappraff, Jay. *Connections: The Geometric Bridge Between Art and Science*. World Scientific Publishing, Singapore, 2001.
- Kalay, Yehuda, Schaumann, Davide, Wan Hong Seung i Simeone, Davide. Beyond BIM: Next-Generation Building Information Modeling to Support Form, Function, and Use of Buildings. u *Building Information Modeling: BIM in Current and Future Practice*. Eds: M. Kensek, Karen i Noble, Douglas. John Wiley & Sons, 2014. pp. 323 - 334.
- Keler, Wolfgang. *Geštalt psihologija*. Nolit, Beograd, 1985.
- Kelly, Kevin. *Out of Control: The New Biology of Machines, Social Systems, and the Economic World*. 1994. dostup na ://www.kk.org/outofcontrol/contents.php (Pristup 20. 08. 2018.)

- Klein, Felix. A comparative review of recent researches in geometry. *New York Math. Soc.* 2, 1892 - 1893. pp. 215-249.
- Kline, Morris. *Mathematics and the Physical World*. John Murray. London, 1959.
- Koare, Aleksandar. *Naučna revolucija*, Nolit, Beograd, 1981.
- Kolarevic, Branko. Post-Digital Architecture: Towards Integrative Design. *First International Conference on Critical Digital: What Matters(s)?*, Harvard University Graduate School of Design, Cambridge, 2008. pp. 149 - 156.
- Kolarevic, Branko. ed., *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*. Spon Press - Taylor & Francis Group, New York, London, 2003.
- Korać, Žarko. *Razvoj psihologije opažanja*. Nolit, Beograd, 1985.
- Krier, Rob. *Architectural Composition*. Acadamy editions, London, 1988.
- Krohn, Wolfgang i Kuppers, Gunther. Selforganization: Portrait of a Scientific Revolution. *Sociology of sciences yearbook*, Kluwer Academic Press, Dordrecht, 1990.
- Krstić, Branislav. *Čovjek i prostor*. Svjetlost, Sarajevo, 1982.
- Laplante, Phil. *Fractal Mania*. Mc Graw Hill, New York, 1994.
- Langton, Chris. Computation at the Edge of Chaos: Phase transition and emergent computation. *Physica*, D 42, 1990. pp. 12 - 37.
- Lefebvre, Henri. *The Production of Space*. Blackwell, Oxford, 1991.
- Linč, Kevin. *Slika jednog grada*. Građ. Knjiga, Beograd, 1974.
- Livio, Mario. *The Equation That Couldn't Be Solved: How Mathematical Genius Discovered the Language of Symmetry*. Simon & Schuster, New York, 2006.
- Löfgren, Lars. Unifying foundations - to be seen in the phenomenon of language, *Foundations of Science*, 9(2), 2004. pp. 135 - 189.
- Lubbe, Herman. Stroker, Elisabeth. *Ekološki problemi u kulturnoj mijeni*. Veselin Masleša, Sarajevo, 1990.
- Lynn, Greg. Architectural Curvilinearity: The folded, the pliant and the supple. *Architectural Design* 63: *Folding in Architecture*. Academy Editions, London, 1993, pp. 24 - 31.
- Macauley, Rose. *Simfonije u kamenu*. Izdavački zavod Jugoslavije, Beograd, 1968.

- Maki, Fumihiko. *Investigations in Collective Form*. A Special Publication Number 2, The School of Architecture Washington University, St. Louis, 1964.
- Mandelbrot, Benoit. *The Fractal Geometry of Nature*. W. H. Freeman and Company, New York, 1983.
- Menges, Achim. Computational Morphogenesis: Integral Form Generation and Materialization Processes. *Em'body'ing Virtual Architecture*: The Third International Conference of the Arab Society for Computer Aided Architectural Design ASCAAD, Alexandria, 2007. pp. 725 - 744.
- Million, A. Henry. ed. *Key Monuments of the History of Architecture*. Harry N. Abrams, New York, 1964.
- Mitchell, Melanie. *Complexity, a guided tour*. Oxford University Press, 2009.
- Mitchell, William. J. *The Logic of Architecture*. MIT Press, Cambridge MA, 1990.
- Moon, Francis. *Chaotic and Fractal Dynamics*. John Wiley & Sons, New York, 1992.
- Moussavi, Farshid. *The Function of Form*. Harvard Graduate School of Design/Actar, 2009.
- Neidhardt, Velimir. *Čovjek u prostoru*. Školska knjiga, Zagreb, 1997.
- Nelson, Harold i Stolterman, Erik. Design Judgement: Decision-Making in the 'Real' World. *The Design Journal*, Vol 6, Issue 1, 2003.
- Newman, James. *The World of Mathematics*. Vol.1. George Allen & Unwin, London, 1956.
- Nuttgens, Patrick. *The Story of Architecture*. Phaidon press, London, 1983.
- Oliver, Dick. *Fractal Vision – Put fractals to work for you*. Sams Publishing, Carmel, 1992.
- Ostwald Michael J. Fractal Architecture: Late Twentieth Century Connections, Between Architecture and Fractal Geometry. *Nexus Network Journal*, vol. 3, no. 1. pp. 73 - 84.
- Oxman, Rivka. Theory and design in the first digital age. *Design Studies* vol. 27/ 3, Elsevier, 2006. pp. 229 - 265.
- Parisi, Luciana. *Contagious Architecture: Computation, Aesthetics, and Space*. MIT Press, 2013.
- Pavlović, Branko. *Filozofija prirode*. Naprijed, Zagreb, 1978.
- Pedoe, Dan. *Geometry and the liberal arts*. St. Martin's Press, New York, 1976.
- Petrović, Đorđe. *Teoretičari proporcija*. Vuk Karadžić, Beograd, 1967.
- Pevsner, Nikolaus. *Izvori moderne arhitekture i dizajna*. Izdavački zavod Jugoslavije, Beograd, 1972.
- Pfeifer, Geoff. *The New Materialism: Althusser, Badiou, and Žižek*. Routledge, New York, 2015.

- Picon, Antoine. Architecture and the virtual: Towards a New Materiality. *Thesis*, Bauhaus-Universität Weimar, Heft 3. 2003. pp. 107 - 111.
- Picon, Antoine. Continuity, complexity and emergence: what is the real for digital designers? *Perspecta*, no. 42, 2010. pp. 147 - 157.
- Picon, Antoine i Petit, E. L. Allais. The Ghost of Architecture: The Project and Its Codification. *Perspecta*, Vol. 35, Building Codes, 2004. pp. 8 - 19.
- Pijaže, Žan. *Epistemologija, nauka o čovjeku*. Nolit, Beograd, 1979.
- Poincare, Henri. *Science and Hypothesis*. The Walter Scott Publishing, New York, 1905.
www.gutenberg.org/ebooks/37157.
- Portugali, Juval. What makes cities complex? u Portugali, J. Stolk, E. eds. *Complexity, Cognition, Urban Planning And Design: Post-Proceedings of the 2nd Delft International Conference*. Springer, Heidelberg, 2014. pp.3 -19.
- Portugali, Juval. *Complexity Cognition and the City*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2011.
- Prigogine, Ilya i Stengers, Isabelle. *Order Out of Chaos: Man's New Dialogue with Nature*. Bantam Books, New York, 1984.
- Prigogine, Ilya. *From Being to Becoming: time and complexity in the physical sciences*. W. H. Freeman & Co. San Francisco, 1980.
- Prijić, Snježana. *Oko i svijet, Teorije percepције i dilema realizam-antirealizam*. Hrvatski kulturni dom, Rijeka, 1995.
- Prusinkiewicz, Przemyslaw, Lindenmayer, Aristid. *The Algorithmic Beauty of Plants*. Springer, New York, 1990.
- Prvanović, Mileva. *Osnovi geometrije*. Građ. knjiga, Beograd, 1980.
- Raljević, Zinaid. Korelacija geometrijskih i psiholoških faktora u procesu oblikovanja arhitektonskog prostora. Doktorska disertacija, Arh. Fakultet, Sarajevo, 1990.
- Raskin, Džon. *Vrednosti*. Kultura, Beograd, 1965.
- Sander, Leonard. *Fractals*. Mc Graw-Hill Yearbook of Science and Technology, New York, 1987.
- Roth, Leland M. *Understanding architecture*. The Herbert Press, London, 1994.
- Russell, Dietrich i Elger, Peter. The Meaning of BIM, Towards a Bionic Building, *Architecture in Computro*, 26th eCAADe Conference Proceedings. Antwerpen, 2008. pp. 531 - 536.

- Saitta, L., Zucker, J. *Abstraction in Artificial Intelligence and Complex Systems*. Springer Science & Business, New York, 2013.
- Schemer, Fabian. Materialising Complexity. u *The New Structuralism*, AD, vol 80. no 4. Wiley, 2010. pp. 86-94.
- Schumacher, Patrik. The Progress of Geometry as Design Resource, u: *Log, Issue on Geometry*, London, 2018.
- Schumacher, Patrik. Design Parameters to Parametric Design. u Mitra, Kanaani. Dak, Kopec. Eds. *The Routledge Companion for Architecture Design and Practice: Established and Emerging Trends*. Routledge, Taylor and Francis, New York, 2016.
- Schroeder, Manfred. *Fractals, Chaos, Power laws*. W. H. Freeman, New York, 1991.
- Shubnikov, A.V., Koptsik, A. *Symmetry in science and art*. Plenum Press, New York. 1974.
- Scruton, Roger. *The Aesthetic of Architecture*. Princeton University Press, Princeton, 1979.
- Simon, Herbert. A. *Sciences of the Artificial*. MIT Press, Cambridge MA, 1996.
- Snodgrass, Adrian i Coyne, Richard. Models, Metaphors and the Hermeneutics of Designing, Design Issues, Vol. 9, No. 1, 1992. str. 56-74.
- Stierlin, Henri. *Encyclopedia of world architecture*. Evergreen, Taschen, Cologne, 1994.
- Supek, Ivan. *Nova fizika*. Školska knjiga, Zagreb, 1966.
- Šulc, Kristijan–Norberg. *Egzistencija, prostor, arhitektura*. Građevinska knjiga, Beograd, 1975.
- Thompson, D'Arcy W. *On Growth and Form*. University Press, Cambridge, 1942.
- Torretti, Roberto. *Philosophy of Geometry from Riemann to Poincare*. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, 1978.
- Unger, Mangabeira, Roberto. Smolin, Lee. *The Singular Universe and the Reality of Time: A Proposal in Natural Philosophy*. Cambridge University Press, 2015.
- Venturi, Robert. *Složenosti i protivrečnosti u arhitekturi*. Grad. knjiga, Beograd, 1989.
- Virant, Jernej. *Z računalnikom v fraktsko geometrijo narave*. Didakta, Ljubljana, 1991.
- Vitruvius, P. M. *De arhitektura libri decem - Deset knjiga o arhitekturi*. Golden Marketing, Institut građevinarstva Hrvatske, Zagreb, 1999.
- Van Doesburg, Theo. Towards a plastic architecture. *De Stijl*, XII, 6/7, Rotterdam, 1924.

- Vidler, Anthony. *Diagrams of Diagrams: Architectural Abstraction and Modern Representation.* Representations, No. 72. University of California Press, 2000. pp. 1 - 20.
- Von Foerster, Heinz. *On Self-Organizing Systems and Their Environments.* u Yovits M.C. Cameron, S. (eds.) *Self-Organizing Systems*, Pergamon Press, London, 1960.
- Von Bertalanffy, Ludwig. *General System Theory: Foundations, Development, Applications.* George Brazillier, New York, 1968.
- Von Neumann, John. Burks, Arthur, W. ed. *Theory of Self-Reproducing Automata.* University of Illinois Press, Urbana, London, 1966.
- Waldrop, M. Mitchell. *Complexity: The Emerging Science at the Edge of Order and Chaos.* Simon and Schuster, New York, 1993.
- Weyl, Henry. *Symmetry.* Princeton University Press, Princeton, 1952.
- Wolfram, Stephen. *A New Kind of Science.* Wolfram Media, Champaign. 2002.
- Wolfram, Stephen. Universality and Complexity in Cellular Automata, *Physica D.* 10, 1984.
pp. 1 – 35.
- Wright, Frank.Lloyd. In the Cause of Architecture. *The Architectural Record*, no 3. Vol XXIII, 1908.
pp. 155 - 165.
- Yaglom, I.M. *Geometric Transformations I.* The Mathematical Association of America, 1975.
- Zevi, Bruno. *Pogledi na arhitekturo.* Cankarjeva založba, Ljubljana, 1959.
- Zevi, Bruno. *Architecture as Space: How to look at architecture.* Da Capo Press, New York, 1993.

