

# VIRTUALNI INŽENIRING I.

Komponente virtualnega inženiringa, zapiski predavanj



Gorazd Hren





Univerza v Mariboru

Fakulteta za energetiko

# VIRTUALNI INŽENIRING I.

Komponente virtualnega inženiringa,  
zapiski predavanj

Avtor

**Gorazd Hren**

Maj 2024

**Naslov** Virtualni inženiring I.  
*Title* Virtual Engineering I.

**Podnaslov** Komponente virtualnega inženiringa, zapiski predavanj  
*Subtitle* Virtual Engineering Components, Lecture Notes

**Avtor** Gorazd Hren  
*Author* (Univerza v Mariboru, Fakulteta za energetiko)

**Recenzija** Andrej Predin  
*Review* (Univerza v Mariboru, Fakulteta za energetiko)

**Tehnični urednik** Jan Perša  
*Technical editor* (Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba)

**Oblikovanje ovitka** Jan Perša  
*Cover designer* (Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba)

**Grafične priloge** Hren (avtor), 2024  
*Graphic material*

**Grtafika na ovitku** Artificial intelligence, avtor: Entre\_Humos, pixabay.com, 2024  
*Cover graphics*

**Založnik** Univerza v Mariboru  
*Published by* Univerzitetna založba  
Slomškov trg 15  
2000 Maribor, Slovenija  
<https://press.um.si>  
zalozba@um.si

**Izdajatelj** Univerza v Mariboru  
*Issued by* Fakulteta za energetiko  
Hočevarjev trg 1  
8270 Krško, Slovenija  
<https://www.fe.um.si>  
fe@um.si

**Izdaja** Prva izdaja  
*Edition*

**Izdano** Maribor, maj 2024  
*Published at*

**Vrsta publikacije** E-knjiga  
*Publication type*

**Dostopno na** <https://press.um.si/index.php/ump/catalog/book/876>  
*Available at*

CIP - Kataložni zapis o publikaciji  
Univerzitetna knjižnica Maribor

004.946:005.336.5 (0.034.2)

HREN, Gorazd  
Virtualni inženiring I [Elektronski vir] : komponente virtualnega inženiringa, zapiski predavanj / avtor Gorazd Hren. - 1. izd. - E-publikacija. - Maribor : Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba, 2024

Način dostopa (URL) :  
<https://press.um.si/index.php/ump/catalog/book/876>  
ISBN 978-961-286-865-9  
doi: 10.18690/um.fe.1.2024  
COBISS.SI-ID 194848003



© Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba  
/ University of Maribor, University Press

**Besedilo/ Text** © Hren, 2024

To delo je objavljeno pod licenco Creative Commons Priznanje avtorstva 4.0 Mednarodna. / This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License.

Uporabnikom je dovoljeno tako nekomercialno kot tudi komercialno reproduciranje, distribuiranje, dajanje v najem, javna priobčitev in predelava avtorskega dela, pod pogojem, da navedejo avtorja izvirnega dela.

Vsa gradiva tretjih oseb v tej knjigi so objavljena pod licenco Creative Commons, razen če to ni navedeno drugače. Če želite ponovno uporabiti gradivo tretjih oseb, ki ni zajeto v licenci Creative Commons, boste morali pridobiti dovoljenje neposredno od imetnika avtorskih pravic.

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

**ISBN** 978-961-286-865-9 (pdf)

**DOI** <https://doi.org/10.18690/um.fe.1.2024>

**Cena** Brezplačni izvod  
*Price*

**Odgovorna oseba založnika** prof. dr. Zdravko Kačič,  
*For publisher* rektor Univerze v Mariboru

**Citiranje** Hren, G., (2024). *Virtualni inženiring I.: komponente virtualnega inženiringa, zapiski predavanj*. Univerza v Mariboru,  
*Attribution* Univerzitetna založba. doi: 10.18690/um.fe.1.2024

# Kazalo

<b>Predgovor.....</b>	<b>1</b>
<b>1    <b>Uvod.....</b></b>	<b>3</b>
<b>2    <b>Proces oblikovanja.....</b></b>	<b>5</b>
<b>3    <b>Komponente virtualnega inženiringa .....</b></b>	<b>11</b>
3.1    Sistemi CAD .....	12
3.2    Povratni inženiring.....	21
3.3    Računalniško podprta avtomatizacija pri designu .....	25
3.4    Prototipi.....	26
3.5    Virtualno okolje.....	31
3.6    Računalniško podprti inženiring .....	35
3.6.1    Numerične simulacije – metoda končnih elementov.....	38
3.6.2    Numerične simulacije – metoda končnih volumnov .....	51
3.6.3    Simulacije gibanja .....	69
3.7    Virtualna proizvodnja .....	71
3.8    Virtualna kontrola kakovosti in verifikacija.....	72
<b>4    <b>Virtualni razvoj izdelkov .....</b></b>	<b>75</b>
<b>Literatura .....</b>	<b>81</b>



## Predgovor

Zapiski predavanj so namenjeni študentom tehnike, ki se dnevno srečujejo z računalniškimi tehnologijami pri svojem študiju. Na predavanjih na Fakulteti za energetiko so predavanja pri predmetu Virtualni inženiring po vertikali naslednja za 3D modeliranjem in osnovami numeričnega modeliranja. Oba predmeta tvorita osnovo za uporabo kompleksnejših numeričnih metod za simulacije trdnin in tekočin, kot sta metoda končnih elementov in metoda končnih volumnov. Namen predmeta Virtualni inženiring je seznaniti študente s posameznimi komponentami in trendi na področju inženiringa, predvsem z uporabo računalniških orodij, ki so v izrazitem trendu. Poudarek je na splošnem poznavanju komponent virtualnega inženiringa, njihovih lastnosti, prednosti in slabosti. Za bolj poglobljeno znanje s področja posameznih komponent virtualnega inženiringa, geometrijskega modeliranja in skeniranja, inženirskih simulacij, izdelave virtualnih prototipov in fizičnih prototipov z dodajnimi tehnologijami, ter tudi ostalih sistemov, ki tvorijo virtualni inženiring je potrebno poseči po specializirani literaturi.





# 1 Uvod

Virtualni inženiring je koncept delovanja podjetij v času ko sledimo hitremu razvoju tehnologij, tako na področju uporabe računalniških in spletnih tehnologij v smeri industrije 4.0 – družbe 5.0 – industrije 5.0 in zelenim prehodom v trajnostno naravnano industrijo in družbo.

Digitalizacija, virtualizacija in virtualni inženiring so trije pojmi, ki se v današnjem pogovornem jeziku, posebej inženirskem, nenehno prepletajo.

V teh zapiskih so predstavljene komponente virtualnega inženiringa od samega procesa oblikovanja, ki je pravzaprav uvod v virtualni inženiring. Sam proces virtualnega inženiringa izdelkov nekako temelji na geometriji, ki tvori osnovo za vse naslednje aktivnosti. V naslednjem poglavju so najprej opisani sistemi za pridobivanje geometrijskih podatkov: modeliranje in skeniranje. V nadaljnjih podpoglavjih so opisani sistemi, ki geometrijo uporabljajo za vizualizacijo, izdelavo prototipov, simulacije in avtomatizacijo razvoja izdelkov. Poglavje zaključuje aplikacije vezane na sisteme izdelave in kontrole kakovosti.

V četrtem poglavju se osredotočamo na pristope, ki so spoznani kot smernice za uvajanje virtualnega inženiringa v celoti in ne le kot dodatne komponente k običajnim postopkom. Zapiske zaključuje uporabljena literatura.



## 2 Proces oblikovanja

*DESIGN* in *DESIGN PROCESS* je besedna zveza, ki smo jo podomačili in jo uporabljamo v vseh jezikih, in nekako vključuje vse aktivnosti pri zasnovi novega ali spremembi obstoječega izdelka. Vključuje aktivnosti, ki so vezane na zahtevano funkcionalnost, uporabljene materiale, tehnologijo izdelave in nenazadnje na zunanji izgled. V zadnjem desetletju ali več pa tudi možnosti reciklaže oziroma izrabe materiala odsluženih izdelkov. V slovenskem prostoru nekako uporabljamo izraz proces konstruiranja, ki je pomensko bolj vezan na zasnovo, preračune, uporabljene materiale, trdnostne analize manj poudarka pa daje na samo obliko ali reciklažo. V duhu časa velikokrat na različnih področjih uporabljamo kar tujko, ki ima v slovarju slovenskega knjižnega jezika naslednjo definicijo (FRAN; <https://fran.si>):

*Design: dajanje oblike predmetu z upoštevanjem skladnosti med funkcionalnostjo, estetiko in tehnološkim procesom, (industrijsko) oblikovanje ([www.fran.si](http://www.fran.si))*

Za eno od definicij lahko citiramo enega najbolj znanih oblikovalcev:

*"Design is the fundamental soul of a man-made creation that ends up expressing itself in successive outer layers of the product or service.*

*Design is not just what it looks like and feels like. Design is how it works."*

*Steve Jobs, Apple*

Sam proces je opisan v veliko knjigah, tako teoretski postopki, kot različni pristopi, uvajanje spremembe in zgodovinske posodobitve. Ugotovimo lahko, da se je proces designa v zadnjih dveh desetletjih spremenil - iz orientiranega na izdelek v orientiranega na uporabnika. Druga izrazita sprememba je vključitev računalniških orodij v sam proces designa. Možnosti uporabe računalniških sistemov, razvoja perifernih enot in računalniške grafike, in svetovnega spleta od iskanja po katalogih polizdelkov, raziskav trga pa do udejanjanje zamisli, preračunov, fantastičnih grafičnih predstavitev in simulacij je vnesla v sam proces popolnoma novo dimenzijo. Ugotovimo lahko, da računalniška podpora ni več dodatek k ostalim aktivnostim, ker je takšno delo neučinkovito in polno podvajanja, temveč je za učinkovito delo potrebno spremeniti organizacijsko strukturo dela. Način dela je potrebno reorganizirati in prirediti, celo podrediti, računalniški strukturi in predpisanim relacijam med posameznimi elementi in komponentami. Način dostopa in organiziranost dela je pravzaprav prirejen informacijski strukturi in programju s tega področja. Novo strukturo dela, ki jo narekujejo računalniška orodja, ki so povezana in integrirana v zelo razgibano in razvejano celoto imenujemo *virtualni inženiring*.

Žal moramo imeti v življenju srečo, da lahko sodelujemo pri zasnovi in razvoju popolnoma novega izdelka. V praksi nas potrebe trga po izboljšanih izdelkih večinoma silijo v prilagoditve že obstoječih rešitev, da je čas razvoja krajši in izdelek hitreje na trgu. Kljub temu se design izdelkov nenehno izboljšuje saj je potrebno preveriti in upoštevati: nove materiale, nove ideje, nove predpise, spremembe standardov.



Slika 1: Primer razvoj izdelka - od žarnice do sijalke.

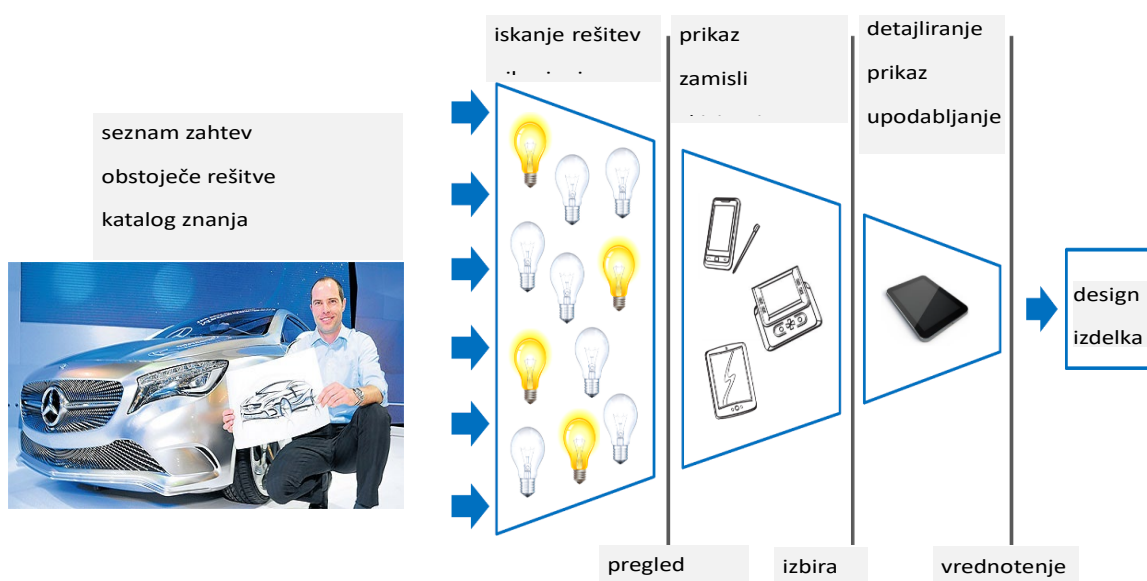
Vsakokratni izzivi, ki jih proces (re)designa predstavlja:

- Visoka kakovost.
- Nizka cena.
- Kratek čas razvoja in vstopa na trg.
- Prednosti in konfiguracije, različice in verzije.
- Uporabniško konfigurirani izdelki za visoko stopnjo personalizacije.
- Eko-, bio-, zeleno-, naravno vzdržno, temeljne človeške pravice,...

Konceptualni razvoj izdelka sestavljajo:

- IDEJE (*Ideation*) – proces kreiranja novih idej in zamisli.
- ZASNOVA (*Conceptual Design*) – prednost ima hipotetična funkcija ali izgled.
- OBLIKOVANJE (*Industrial Design*) – izboljšanje izgleda, ergonomije, uporabnosti.

Na sliki 2 so prikazane faze razvoja koncepta do designa izdelka (zraven pa Robert Lešnik, Mariborčan, vodja zunanjega oblikovanja Mercedes Benz [*mercedes-benz.si*]).



Slika 2: Konceptualni razvoj izdelka

Vir: prirejeno po Shimada: Introduction to CAD/CAE Tools.

Konceptualni razvoj lahko razdelimo v štiri faze, v katerih imamo pravzaprav najmanj neposredne podpore računalniških orodij, no razen listanja po katalogih, iskanja obstoječih rešitev, predpisov, ...

### 1. Seznam zahtev:

- Referenčni izdelki.
- Tehnična specifikacije.
- Zahteve glede lastnosti.
- Ciljni profil kupca.
- Želje stranke.

### 2. Iskanje rešitve, viharjenje idej:

- Uskladitev z zahtevami in cilji.
- Kombinacija posameznih in skupinskih dejavnosti.
- Običajno kreativni sestanki.
- Nobena ideja ni slaba ideja.

**3. Zamisli:**

- Izkoristiti rezultate viharjenja idej.
- Preverjanje zahtev in ciljev.
- Veliko skic in sličic.

**4. Detajliranje:**

- Več vidikov rešitev.
- Tehnična izvedljivost in možnost izdelave.
- Kakovost, stroški in čas do prodaje.
- Konkurenčnost.
- Predstavitev celote.

Konceptualni razvoj izdelka nekako še ne vključujemo neposredno v virtualni inženiring, čeprav že nastajajo dokumenti v različnih formatih, posebej kadar gre za pregled obstoječih rešitev in modifikacije. Nadaljnji razvoj koncepta do končnega industrijskega imenujemo inženiring izdelka, ki ga sestavljajo:

**VHODI**

- Podatki o zasnovi in zamislih.
- Zahteve (začetne).
- Referenčni podatki.

**IZHODI**

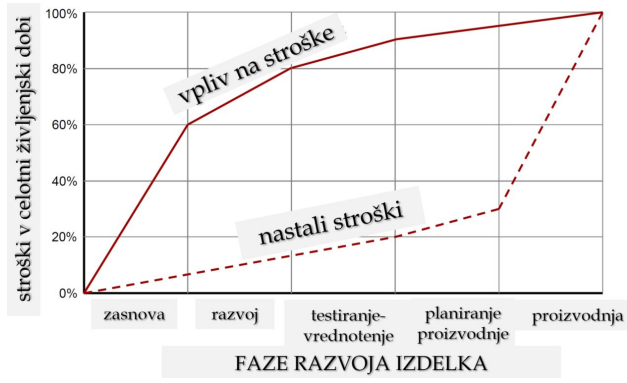
- Tehnična dokumentacija.
- Podatki in zahteve o proizvodnji.
- Kosovnica (BOM bill of material).

**IZZIVI**

- Časovni roki.
- Stroški razvoja in proizvodnje.
- Kakovost.
- Zahtevnost in možnosti dodajanja sprememb, inačic, verzij.

Sam inženiring izdelka zelo vpliva na končne stroške izdelka. Slika 3 prikazuje stroškovni vpliv posameznih faz inženiringa in vpliv na stroške končnega izdelka in pravilo 10. Pravilo 10 referirana stroške, ki nastajajo z odpravljanjem napak. Napake se lahko pojavijo v katerikoli fazi razvoja, pozneje ko uvidimo napako, ki jo je potrebno odpraviti, večji so stroški odpravljanja. Na sliki vidimo, da so ocenjeni stroški odpravljanja napak za 10krat večji iz faze v fazo razvoja.

Bistveno je, da spoznamo, da kljub majhnim stroškom razvoja, testiranja in planiranja proizvodnje izdelka, te faze razvoja izredno vplivajo na končne stroške samega izdelka. Napake med razvojem izdelka stanejo toliko več, kolikor pozno v procesu so prepoznane in je potrebno izdelek spremeniti.



Čas spremembe	Stroški spremembe
Med razvojem	X
Med testiranjem	10 X
Med planiranjem proizvodnje	100 X
Med testiranjem proizvodnje	1000 X
Med končno proizvodnjo	10000 X

Slika 3: Stroški posameznih faz razvoja izdelka in pravilo 10.

Vir: prirejeno po Shimada: Introduction to CAD/CAE Tools.





## 3 Komponente virtualnega inženiringa

Virtualni inženiring je integriran sistem naprednih računalniških tehnologij, ki omogočajo inženirjem procesiranje podatkov in odločanje pri razvoju in izdelavi izdelkov in procesov, predvsem za kakovostnimi simulacijami geometrijskih, funkcionalnih in fizikalnih lastnosti izdelkov in procesov. Virtualni inženiring vključuje simulacijo različnih inženirskih dejavnosti, od načrtovanja, izdelave orodij in posameznih komponent izdelka, do montaže, vodenja procesov, vzdrževanja, servisiranja in recikliranja. Uporaba simulacij na digitalnih modelih lahko odpravi, ali bistveno zmanjša potrebne, drage fizične prototipe in testiranja le-teh. Čas razvoja je skrajšan, testirati in optimirati je mogoče več alternativ pri oblikovanju in posledično večjo kakovost izdelkov in procesov. Virtualni inženiring je v osnovi tudi odličen uporabniški vmesnik, ki omogoča vpogled v tridimenzionalni model izdelka, izvajanje sprememb, ko so potrebne in ugotavljanje obnašanja materiala med proizvodnimi procesi. Takšne lastnosti sistema virtualnega inženiringa so izrazite v avtomobilski, letalski, ladjedelniški in vesoljski industriji, kjer so fizični prototipi izjemno kompleksni in seveda izredno dragi ter zahtevajo dolgotrajen razvoj.

Po analizi ključnih elementov pri uporabi virtualnega inženiringa izdelkov:

- parametričen opis v CAD modeliranju,
- CAE simulacije in analize,
- CNC proizvodnjo,
- verifikacijo s simulacijami in dodajnimi tehnologijami za izdelavo hitrih fizičnih prototipov,

- Digital Mock-Up za ustvarjanje robustnega integriranega informacijskega sistema in
- prednosti uporabe tehnologij navidezne resničnosti za interaktivno vrednotenje virtualnih prototipov, dosednji rezultati potrjujejo, da vodijo v zelo konkurenčni inženiring.

V integriran sistem virtualnega inženiringa zagotovo sodijo tudi tehnologije obratnega inženiringa, ki se uspešno uporabljajo za optimizacijo komponent pri vključevanju ali zamenjavi z novimi materiali za že obstoječe tehnologije in na splošno za izboljšanje in prenavo obstoječih izdelkov in procesov. Na podlagi analiz v digitalni in fizični obliki lahko ugotovimo, da se digitalno/virtualno preverjanje z modeliranjem in simulacijami vedno pogosteje uporablja v zgodnjih fazah razvoja izdelka, saj so stroški bistveno nižji kot pri fizičnem testiranju.

V začetnih podpoglavjih opisujemo nastajanje, kreiranje ali generiranje geometrijskih modelov, ki v kakršnikoli obliki tvorijo osnovo za vse nadaljnje aktivnosti. Geometrijske modele (3D) potrebujemo za izvedbo hitrih prototipov, virtualnih prototipov in večino simulacij, naj so trdnostne, funkcionalne, izdelovalne pa tudi kontrolo kakovosti končnih izdelkov.

### 3.1 Sistemi CAD

Sistemi CAD omogočajo kreiranje, spreminjanje in shranjevanje 3D geometrijskih digitalnih modelov, ki nam omogočajo vse naslednje aplikacije. 3D geometrijski modeli iz CAD so osnova za vse naslednje faze razvoja izdelka. Poudariti je potrebno, da sistemi CAD tvorijo idealno geometrijo modelov, ki je v praksi nedosegljiva.

Direktno jih uporabljamo za:

- Proizvodnja CNC – direktno programiranje numerično krmiljenih strojev.
- Izdelava prototipov – hiter prenos iz digitalnega v fizični svet.
- Avtomatizacija – majhni dodatni stroški za ustvarjanje več konfiguracij izdelkov in prilagajanje zahtevam posameznikom.
- Podrobnosti oblikovanja – sposobnost oblikovanja in komunikacije o zelo kompleksnih delih in procesih (nemogoče storiti brez 3D-oblikovanja).
- Vizualizacija – realistični prikaz za komunikacijo.

- Simulacije in analize – možnost analiziranja 3D-modelov v zgodnih fazah razvoja, pogosto v ciklu oblikovanja za optimizacijo zasnove in prepoznavanje napak brez fizičnih komponent.

Implementacija sistemov CAD v proizvodnjo je po oceni več podjetij bistveno povečala natančnost in zmanjšala čas razvoja:

- 10% manj napak.
- 20% manj zaposlenih za enako učinkovitost (a usposobljenih).
- 30% zmanjšanje časa popravljanja.
- 30% zmanjšanje časa razvoja.
- 10% skupni prihranek stroškov ob izdelavi nove verzije izdelka.
- 50% zmanjšanja števila prototipov.

Osnova sistemov CAD je učinkovita uporaba računalniške grafike za predstavitev digitalnih modelov in digitalni zapis geometrije in relacij med elementi geometrije.

Modeli so v računalniški grafiki predstavljeni kot:

- ploskve: poligonske mreže, deljene ploskve (parametrično opisane, implicitne, ...)
- volumska telesa: osmiška drevesa, B-rep drevesa, CSG, ...
- višje-nivojske strukture (scenski grafi)
- neposredno zajeti podatki (vokslji, oblaki točk, globinske slike, ...)

Želimo, da je predstavitev modelov CAD čimbolj:

- Natančna, zgoščena, intuitivna,
- podpira poljubno topologijo,
- zvezna oziroma gladka,
- učinkovita za prikaz,
- učinkovita za operacije (kot je računanje presekov, volumnov, površin, ...).

Najpogostejša je predstavitev s poligoni, predvsem s trikotniki s katerimi so operacije enostavnejše zaradi njihovih lastnosti:

- so vedno planarni (določajo ravnino);

- so vedno konveksni (vsak notranji kot  $< 180$  stopinj, vsaka črta med dvema robovoma v celoti leži znotraj trikotnika).

Pri predstavitev ločimo dve vrsti informacij:

- **geometrija**: kje so poligoni v 3D prostoru (koordinate oglišč, točk);
- **topologija**: kako so točke povezane v poligone, poligoni v ploskve in ploskve v telo.

Ta delitev bistveno pohitri vse geometrijske operacije v prostoru (premikanje, rotiranje, merilo, zrcaljenje, ...).

Obvladovanje krivulj je ena od bistvenih lastnosti sistemov CAD, saj so modeli sestavljeni iz točk in krivulj in krivulje uporabljamo za tvorjenje ploskev z uporabo transformacij.

- Analitično so krivulje neskončne in zvezne funkcije – računalnik obvladuje diskretne sisteme – potrebujemo diskretno matematiko – krivulje sestavimo iz segmentov.
- Krivulja je lahko enostavna – črta ali sestavljena iz segmentov, zlepkov.

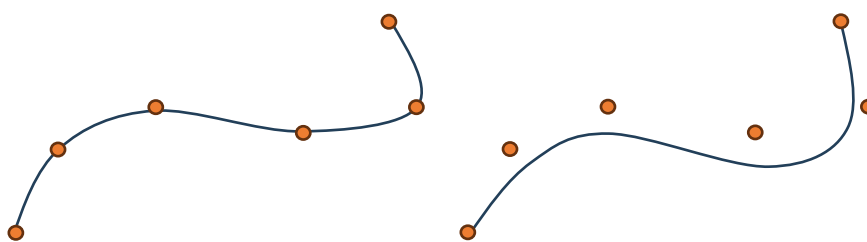
**Analitične** – krivuljo lahko opišemo z matematično enačbo (na primer: stožnice); imajo fiksno obliko in jih ne moremo modificirati s prijemi, ki ne zagotavljajo analitičnega opisa.

Krivulje, na primer linijo, lahko zapišemo:

<i>Eksplicitno:</i>	$y=kx+c$
<i>Implicitno:</i>	$ax+by+c=0$
<i>Parametrično:</i>	
$u$ je parameter razdalje vzdolž linije; zapis omogoča normiranje, več parametrov za spreminjanje, preslikavo zapisa v matrično obliko in s tem učinkovito računanje: transformacij, rotacij in skaliranja.	$P_x(u) = a_{1x}u + a_{0x}$ $P_y(u) = a_{1y}u + a_{0y}$ $P_z(u) = a_{1z}u + a_{0z}$

Krivulje so pogosto:

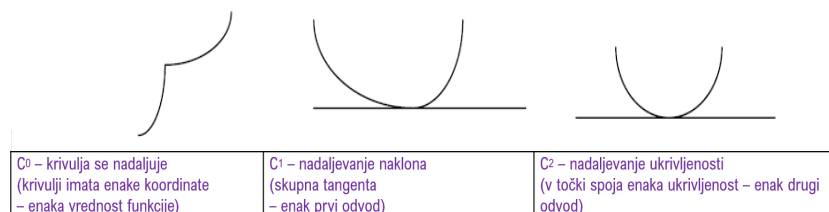
- *Interpolacijske* – definirane s poligonom točk, ki fiksno določajo obliko; med danimi točkami iščemo interpolacijsko krivuljo; nekaj fleksibilnosti omogoča položaj točk; najpogosteje je uporabljen Lagrange polinom – red polinoma je odvisen od števila točk.
- *Aproksimativne* – krivulja aproksimira namišljeno črto skozi zbir točk; ne gre nujno skozi točke – gladke krivulje; velika fleksibilnost pri kreiranju krivulj kompleksnih oblik; linearna aproksimacija (veliko število linearnih krivulj, natančnost je odvisna od števila segmentov); nelinearna aproksimacija – zveznost.



Slika 4: Primer interpolacije in aproksimacije krivulje na enakem poligonu kontrolnih točk.

Krivulje imajo nekatere zelo željene lastnosti v interaktivni računalniški grafiki:

- Kontrolne točke skozi katere poteka krivulja interpolacija ali s katerimi vplivamo na obliko krivulje aproksimacija. Če kontrolne točke povežemo z daljicami dobimo lomljenko – *polyline*.
- So neodvisne od koordinatnega sistema, če rotiramo koordinatni sistem rotira tudi krivulja, ki se ji oblika pri rotaciji ne spremeni.
- Omogočajo kontrolo nad obliko, premik kontrolne točke vpliva na obliko lokalno, ki je pri zagotavljanju interaktivnosti zaželeno, ali globalno – pri premiku točke se spremeni oblika celotne krivulje.
- Red zveznosti pri sestavljenih krivuljah: kompleksnejše krivulje sestavimo iz segmentov, ki se stikajo v stičiščih (*knots, joints*) – aproksimacija po kosih. Kakovost prilaganja segmentov v stičiščih opisujemo z redom zveznosti:  $C^n$ 
  - $C^0$  – segmenta se stikata (*point continuous*).
  - $C^1$  – segmenta imata v stičišču enako tangento (*slope continuous*).
  - $C^2$  – segmenta imata v stičišču enako ukrivljenost (*curvature continuous*).



Slika 5: Tipi zveznosti krivulj

V sistemih CAD se uporabljajo naslednji tipi krivulj:

- Interpolacijske krivulje
- Hermite-vi zleпки – interpolacija –  $C^1$
- Bezier-jeve krivulje – aproksimacija –  $C^1$
- B-zleпки (B-spline) – aproksimacija –  $C^2$
- NURBS – aproksimacija –  $C^2$

V CAD se uporabljajo večinoma krivulje 3. reda, ki omogočajo zveznost  $C^2$ .

Najbolj pogosti in v nekaterih novejših sistemih CAD so krivulje predstavljene samo z NURBS - *Non-Uniform Rational B-Splines*": zbir neenakih racionalnih B-zlepkov (racionalne krivulje z ne-ekvidistančno parameterizacijo). NURBS imajo med vsemi predstavitvami krivulj največ možnosti predstavitve: Bezier-jeve in B-zleпки so le podmnožice krivulj NURBS. NURBS krivulje imajo več lastnosti, ki omogočajo večji nadzor nad obliko:

- Omogočajo natančen opis analitičnih krivulj.
- Vsaka kontrolna točka je lahko utežena; izredna kontrola nad obliko krivulje.
- Kontroliramo lahko natančnost prileganja krivulje, risanje krivulj prostih oblik.
- Krivuljo lahko parametriziramo na več načinov.

Vsaka kontrolna točka krivulje NURBS ima štiri parametre: vrednosti  $x$ ,  $y$ ,  $z$  in utež  $w$ . Utež predstavlja vpliv kontrolne točke na segmente krivulje v njeni bližini. Utež je vedno večja od 0: večja ko je utež kontrolne točke, bolj se ji krivulja ali neka ploskev približujeta. Utež, manjša od 1.0 povzroči odmik krivulje oziroma ploskve proč od kontrolne točke.

Geometrijsko modeliranje CAD je uporaba tehnik in metod za čim boljši opis realnih objektov s pomočjo računalniške grafike (podatkovne strukture in algoritmi). Osnovno nasprotje med realnim svetom in digitalno predstavitvijo z računalnikom:

- Realni objekti so zvezni, računalnik omogoča le diskretno predstavitev.
- Realni objekti so podvrženi fizikalnim zakonitostim, računalnik omogoča le simulacijo.

Modelirnik je programski sistem za parametrično kreiranje, shranjevanje in spreminjanje geometrijskih modelov in omogoča:

- Transformacije (translacije in rotacije) lahko izvajamo direktno s parametričnimi enačbami.
- Neskončne krivulje ne predstavljajo težav pri kalkulacijah.
- Odvisne in neodvisne spremenljivke so ločene.
- Parametrične spremenljivke so normalizirane (ni dodatnih podatkov za definiranje mej).
- Enostavno izražanje z vektorji in matrikami, kar omogoča enostavne in učinkovite algoritme in programerske tehnike.

Modelirnik ima pri predstavitvi modelov naslednje formalne zahteve:

- Zaprtost – rob je presek dveh ploskev in ima dve vozlišči (enako število robov in vozlišč okrog ploskve).
- Mejnost – ploskve določajo mejo (lupino), ki ločuje notranjost od zunanosti modela.
- Orientabilnost – obstaja notranjost in zunanost volumskega modela.
- Povezanost – vsak par točk na ploskvi lahko določa krivuljo, ki leži na ploskvi.
- Dimenzijska homogenost – telo ima enotno notranjost brez izoliranih delov.
- Neseekajoče se – ploskev telesa ne seka nobene druge ploskve istega telesa.
- Izvajanje operacij (translacija, rotacija...) nad volumskim modelom ima za rezultat veljaven volumski model.
- Volumski model je predstavljen s končnim številom podatkov (končnim številom ploskev).

Sama predstavitev modelov je lahko:

- **Natančna:** natančen model s topologijo objekta. Vsa geometrija ima matematično osnovo predstavitve (žični, ploskovni in volumski modeli).

- **Aproksimativna:** Z diskretizacijo 3D objektov. Uporaba enostavnih gradnikov za predstavitev geometrije in topologije objektov (mrežna, z označevanjem zavzetega prostora).

Tehnik za predstavitev volumskih teles je več, vendar se v sistemih CAD uporabljajo predvsem:

1. Žični model (predstavitev modela z zbirko oglišč in robov, enostaven in hiter, volumen in površina nista definirana, enostavno kreiranje tudi nemogočih elementov, ni ploskev, pa je pregledovanje zahtevno in interpretacija dvoumna; izboljšava so žični modeli s skritimi robovi).
2. Ploskovni model (predstavitev modela kot zbir ploskev, ki ga omejujejo, natančna definicija površja (oglišča in ploskve so enolično opisane), ploskve nimajo debeline, objekti nimajo definiranih volumnov in volumskih lastnosti; ploskve so lahko odprte; uporaba za standardne formate za prenos geometrije med sistemi: IGES, VDA, STEP).
3. Volumski model (uporaba matematičnih opisov teles; je enoličen, natančen, kompakten in učinkovit; popolna in nedvoumna predstavitev; ima volumske lastnosti: volumen, površino, prerezi, težišče, ...; večina modelirnikov uporablja parametrični zapis in začne s skico 2D; geometrija je definirana z dimenzijami na ploskvah ali referenčnih ravninah).

Za kreiranje in predstavitev volumskih modelov obstaja več metod, pravzaprav uporabljamo hibrid vseh naštetih:

### *Constructive Solid Geometry (CSG) – z osnovnimi gradniki*

Je implicitna, direktna, proceduralna in algoritemska metoda za kreiranje modelov iz osnovnih geometrijskih gradnikov (prizma, valj, stožec, krogla, ...) z uporabo reguliranih Boolovih operatorjev; kombinira osnovne gradnike, sorazmerno enostavna predstavitev, računsko intenzivna, nemogoče predstaviti površine kot "mrežo"; metoda ne omogoča predstavitev kompleksnih teles (prostorsko ukrivljena telesa – turbinske opatice).

### *Boundary representation (B-rep) – predstavitev z ovojnico*

Vsak volumski model omejujejo matematično opisljive ploskve, ki skupaj tvorijo zbir zaprtih in orientiranih ploskev (lupina, ovojnica). Vsaka ploskev mora imeti predpisano normalo, da je možno ugotoviti zaprtost. Volumen je predpisan z unijo mejnih ploskev,



ki so določene z robovi in oglišči. Loči geometrijo in topologijo in zagotavlja topološka in geometrijska celovitost (ploskve imajo skupen rob, skupna oglišča, vsak rob združuje natančno dve ploskvi in je omejen z oglišči, v oglišču se stikajo vsaj 3 robovi). Računsko zelo intenzivna metoda, ki pa omogoča izračun volumskih lastnosti telesa.

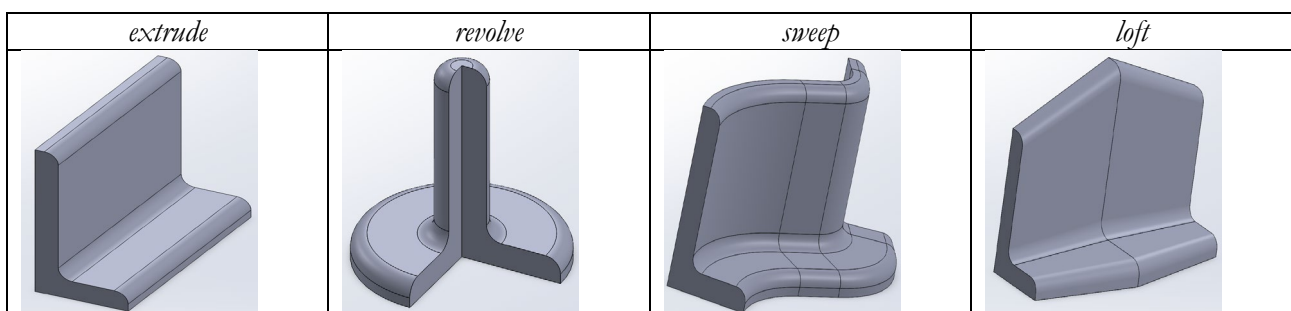
### *Sweep* - s pomikanjem

Model je definiran s pomikanjem ploskve (2D poligon) po vodilni krivulji (liniji, loku...) po kateri se ploskev pomika in opiše 3D volumen. Najbolj pogosta uporaba: translacija in rotacija. Metodo je mogoče direktno povezati z načinom izdelave (vrtanje, struženje). Je intuitivna, enostavna za uporabo; računsko intenzivna in sorazmerno okorna pri predstavitvi.

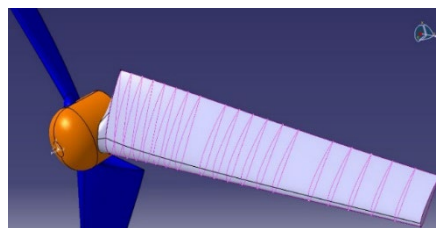
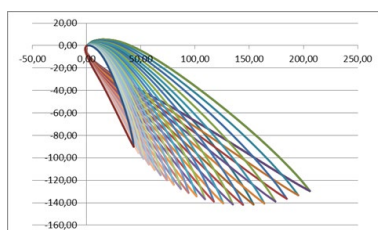
### *Loft* - z vlekom med profili

Model je definiran z več profili v prostoru, iz katerih s pomočjo vodilnih krivulj kreiramo geometrijo telesa. Profili morajo biti za izvajanje operacije pravilno orientirani in umeščeni v prostoru. Za pravilnost modela uporabljamo vodilne krivulje in dodatne relacije med profili.

*Osnovni presek*



Slika 6: Primeri kreiranja geometrije s pomikanjem enakega preseka.



Slika 7: Primer uporabe izračuna profilov, prenosa v CAD in uporabe funkcije loft pri kreiranju rotorske lopatice.

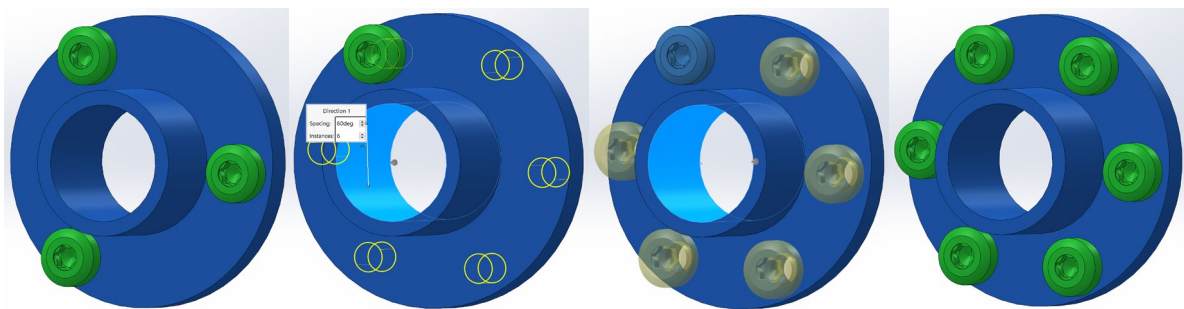
## *Parametric – parametričen zapis*

Dimenzije so parametri, ki jih lahko spreminjamo in učinkujejo na vse ostale parametre s katerimi so v relaciji. Poudarek je na relacijah med elementi in sposobnost kreiranja variant neke osnovne oblike s geometrijskimi transformacijami.

Ko se priučimo kreiranju modelov z izraženim namenom, ugotovimo možnosti, ki jih orodja ponujajo:

- dovoljuje spremembe z minimalnim naporom,
- omogoča predstavitev dela drugim,
- zagotavlja, da so modeli sestavljivi,
- omogoča preverjanje funkcionalnosti in kolizij,
- izdelava dokumentacije, risb, ...
- *Features* - z značilnostmi

Predstavlja višji nivo predstavitve modelov (abstrakcija). Značilnosti so lahko geometrijske, izdelovalne, materialne, tolerančne, ... V CAD govorimo o geometrijskih značilnostih, ki omogočajo lokalne modifikacije geometrije in topologije s vključenim namenom. Kreiranje z značilnostmi pomeni ustvarjanje „postopka“ z vsemi omejitvami, dimenzijami in relacijami med posameznimi elementi. Večinoma so kot dodatne, funkcije (luknja, utor, ...). Najlepši primer značilnosti so vzorci (*pattern*) na naslednji sliki.

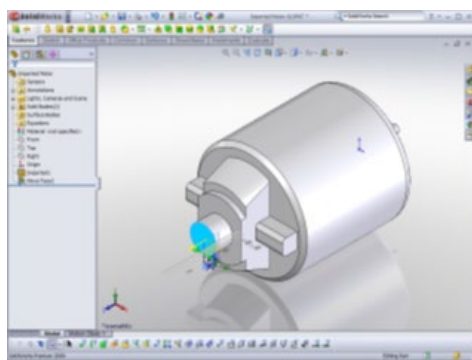


Slika 8: Primer večkratne uporabe vzorca.

## *Direct - direktna*

Glavna omejitev pri uporabi CAD sistemov je potrebno znanje, trening in izkušnje uporabe CAD sistemov (izobraževanje). Inženirji potrebujejo tudi enostavno uporabna orodja za izdelavo konceptov in komunikacijo s soudeleženci v skupini, ki nimajo ustreznih znanj. Uporabniško prijazna CAD je uporaba direktnega modeliranja, omogoča spreminjanje modelov brez poznavanja procesa nastajanja in omogoča enostavno

premikanje in rotiranje ploskev, robov in točk. Gre za neposredno manipulacijo z geometrijo, ki se je lahko naučiti, enostavno prenesti in uporabljati na različnih grafičnih enotah (tablice, telefoni). Spremembe z direktnim modeliranjem so kasneje potrjene preko parametričnega modeliranja.



Slika 9: Primer direktnega modeliranja v SolidWorksu.

CAD sistemi omogočajo kreiranje enotnega digitalnega modela, ki omogoča kreiranje, shranjevanje, spreminjanje in vizualizacijo modelov.

### 3.2 Povratni inženiring

Povratni inženiring (*Reverse Engineering – RE*) je proces digitalizacije obstoječega dela, sklopa ali celotnega izdelka z natančnim merjenjem ali skeniranjem. Uporaba te tehnologije je še posebej uporabna, ko digitalni modeli ali tehnična dokumentacija ni na voljo. Znotraj procesa povratnega inženiringa se razlikujeta dve fazi: prva je sestavljena iz digitalizacije podatkov in druga, v kateri se izvede 3D modeliranje objekta na podlagi pridobljenih podatkov. Izhod prve faze procesa povratnega inženiringa predstavlja digitalni opis objekta v tridimenzionalnem prostoru, ki ga imenujemo oblak točk. Danes je na voljo veliko število metod za 3D digitalizacijo. Kot najbolj znane in uporabljane v praksi, lahko naštejemo sisteme za 3D digitalizacijo: koordinatne merilne stroje (s kontaktnimi ali brezkontaktnimi – laserskimi merilnimi glavami), pa tudi vse bolj popularne ročno vodene 3D skenerje, interferometrijo, fotogravimetrijo, in nenazadnje računalniško tomografijo (CT). Digitalni podatki, običajno predstavljeni kot oblaki točk, ne vsebujejo potrebnih topoloških informacij. Nadalje se obdelajo in preslikajo v bolj uporabno obliko, kot so: 3D model mreže poligonov (večinoma trikotniške mreže), 3D geometrijski model (pridobljen z aplikacijami NURBS površin) ali CAD model. Za obdelavo oblaka točk se uporablja splošna CAD programska oprema, ali specialna programska oprema, na primer *Geomagic*. Namen aplikacij je zapis v obliki primernejši za

vnos v druge sisteme (CAD/CAM/CAE, povratni inženiring, virtualni prototipi) ali za vizualizacijo.

Obstaja več načinov zajemanja ali uvoza 3D podatkov, vendar sta dve osnovni metodi **digitalizacija** in **lasersko skeniranje**. Digitalizacija in skeniranje je »kopiranje« 3D fizičnega sveta v digitalno obliko (obraten proces kot pri dodajnih tehnologijah in hitri izdelavi prototipov s 3D tiskom).

3D skeniranje je bilo razvito pred desetletji, vendar so uporabo zavirale nizke hitrosti prenosa in nizka zmogljivost shranjevanja velike količine podatkov. Prvi ročni 3D skenerji so bili razviti v 80ih letih prejšnjega stoletja, uporabljali so ne dovolj natančne kontaktne sonde in potreben čas za izvedbo skeniranja se je meril v tednih. V 90ih so se zelo povečale možnosti shranjevanja in bistveno se je pohitril prenos velike količine podatkov. Z uporabo računalnikov je bilo mogoče zgraditi zelo kompleksen model, vendar je ostala velika težava pri ustvarjanju modela. Razvoj natančne kontaktne sonde je omogočilo izdelavo natančnejšega modela, vendar je proces zamuden - digitalizacija. Za praktično uporabo potrebujemo sistem, ki zajema veliko količino podatkov z večjo hitrostjo.

## DIGITALIZACIJA

Digitalizacija je neporušna kontaktna oblika zbiranja 3D podatkov.

- Je natančna metoda za posnetje geometrijskih oblik. Izvede se z dotikom sonde na točke na površini objekta.
- S pomočjo točkovne ali kroglične sonde uporabnik zbere posamezne točke predmeta v prostoru, ki jih potrebujemo (ne veliko število točk hkrati, kot pri skeniranju).
- Je omejena po velikosti digitaliziranega predmeta.
- Ta način je na splošno dovolj natančen za opis tehniških predmetov (ne pa organskih ali prostih oblik).

## SKENIRANJE

3D skeniranje je neporušna in nekontaktna tehnologija, ki digitalno zajame obliko fizičnih predmetov z uporabo laserske svetlobe. Za posnetje 3D oblaka točk se dandanes uporabljajo razvite optične tehnologije: skeniranje točk, linij in območja.

- Tehnologija optičnega skeniranja **točk** uporablja eno referenčno točko in večkratno ponavljanje - je najpočasnejša oblika skeniranja in vključuje veliko gibanja senzorja.
- Tehnologija optičnega skeniranja **linij** skenira pas, sestavljen iz več točk in enkratni prehod nad objektom. Izkazala se je za dobro kombinacijo hitrosti in natančnosti in hkrati predstavlja izziv za programsko opremo za izvedbo skeniranja in povezovanje s programi za modeliranje.
- Tehnologijo optičnega skeniranja **območja** je težavna za konfiguriranje (kalibriranje) in manipuliranje, zato ne daje natančnejših rezultatov kot optično skeniranje točk.

3D skenerji ustvarijo "oblake točk" (*point clouds*), izmerijo pozicijo velikega števila točk na površini predmeta. Točke so določene s koordinatami –  $x,y,z$  in barvo - od referenčne točke (koordinatnega izhodišča) in predstavljajo površje objekta. Rezultat skeniranja je oblak točk, niz točk, ki jih je naprava izmerila in je shranjen kot podatkovna datoteka (večinoma ASCII). Neobdelane podatke skeniranja lahko dopolnimo s fotografijami ali modeliranimi elementi, da dobimo natančnejši prikaz sistemov in strojev.



Slika 10: Prikaz oblaka točk, prepoznavanje in vključevanje modeliranih komponent.

Tehnologija *ToF – time of flight* je čas prehoda za tehnologije skeniranja in pomeni meritev časa, ki je potreben, da zvočni, elektromagnetni ali drugi valovi preletijo razdaljo skozi medij. V primeru 3D skeniranja svetloba potuje po zraku in se odbija od skeniranega objekta. S poznavanjem hitrosti svetlobe (laserski žarek) in merjenjem časa potovanja laserskega žarka določimo razdaljo. Kot pri meritvah je potrebno izračunati položaj ( $x, y, z$  znano razdaljo do predmeta (vodoravni kot od znane črte do predmeta in vertikalni kotom do predmeta).

- Med laserskim skeniranjem teče laserska linija po površini objekta. Podatki so zajeti z enim ali več senzorji kamere, nameščenimi v laserskem skenerju, ki beležijo 3D točke v prostoru, kar omogoča zelo natančne podatke



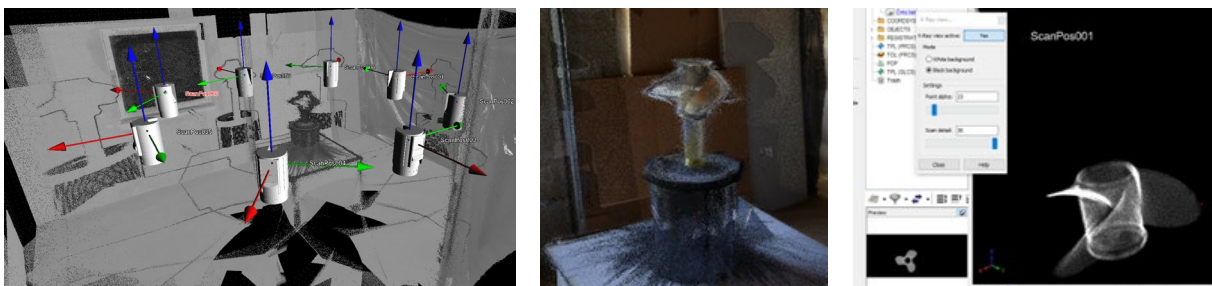
- Lasersko skeniranje je najbolj natančna metoda za skeniranje oblik, je brezstična in se uporablja tudi pri skeniranju večjih objektov (npr. vozil, velikih strojev in zgradb). Uporabna je tudi za dokumentiranje pomembnih artefaktov ali krhkih komponent zaradi meritev brez dotika.

Ne glede na to, ali uporabimo lasersko skeniranje ali digitalizacijo, je pomembno, da se objekt med skeniranjem ne premakne. Najmanjši premik močno spremeni zajete podatke. Luknje ali majhne notranje značilnosti običajno niso takoj vidne zato je potrebno objekt skenirati iz več pozicij. Večina profesionalnih naprav za skeniranje vključuje računalniško vodeno vrtljivo platformo za postavitev predmetov. Aparature so drage in vzdrževanje in servisiranje ni enostavno. Zaradi lastnosti skeniranja je potrebno upoštevati naslednje:

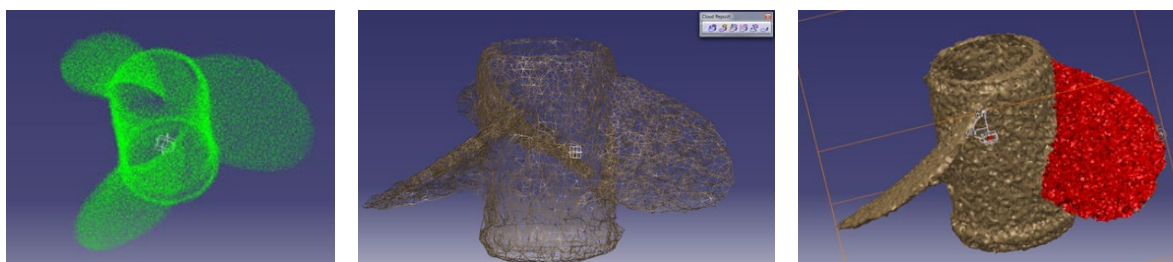
- Viri svetle svetlobe lahko močno spremenijo podatke skeniranja.
- Priporočljivo je, da zunanje predmete skeniramo ponoči.
- Visoko odsevni
- materiali se ne skenirajo dobro (razpršimo prah).

Naslednje slike prikazujejo postopek skeniranja tri-lopaticnega ladijskega vijaka:

- pozicije skenerja v prostoru, prikaz in filtriranje oblaka točk;
- prenos oblaka točk v sistem CAD, obdelava in iskanje referenčnih ploskev;
- prikaz CAD modela.



Slika 11: Prikaz skeniranja, dobljenega oblaka točk in filtriranja oblaka točk.



Slika 12: Prikaz obdelave oblaka točk v sistemu CAD, filtriranje točk, ustvarjanje mreže poligonov.



Slika 13: Prikaz modela v sistemu CAD.

### 3.3 Računalniško podprta avtomatizacija pri designu

V fazi designa je razen tvorjenja geometrije potrebno tudi veliko ponavljajočih se operacij, kot so kalkulacije in preračuni posameznih komponent ali sestavi standardnih komponent in podobno. Na tem področju je mogoče uporabiti veliko računalniških aplikacij in računalniških orodij pri avtomatizaciji postopkov, predvsem kadar gre za tržne niše ali personalizacijo izdelkov. Avtomatizacija postopkov omogoča:

- Povečanje dobička (čas in denar).
- Obvladovanje tržnih niš in posebnih trgov.
- Skrajšanje časa izdelka do trga.
- Natančen izračun stroškov in cene izdelka.
- Izboljšane prodajne možnosti.
- Višjo kakovost izdelka.

Avtomatizacijo delimo na:

1. *Knowledge Based Engineering (KBE)*: Vključevanje znanja ali predhodnih preračunov v CAD modele za standardizacijo in avtomatizacijo.
  - *Capturing* - zajemanje znanja, odločitev, „design intent“ in logike.
  - *Sharing* - skupna raba logike razvoja, ki je ponovno uporabna.
  - *Re-applying* - uporaba logike za avtomatizacijo.

Najbolj znani so generatorji za preračune parametrov standardnih elementov in sklopov (preračuni vzmeti, vijakov, gredi, zobniških parov, ipd.) in makro programiranje v CAD.

2. *Engineer-to-Order (ETO)*: Izdelek je zasnovan in izdelan za vsako naročilo posebej (upoštevata pravila strukture).
  - Izdelki imajo vključena pravila, parametre, ki zahtevajo podatke za več variacij izdelkov.
  - Pogosto so komponente, ki so specifične za en sam izdelek.
  - Za vsako naročilo je potreben inženiring, ki je večinoma avtomatiziran.
  - Posledica naročila so unikatni izdelki.
  
3. *Configure-to-Order (CTO)*: Metode, ki omogočajo ustvarjanje verzij, inačic, različic, in upravlja s podatki.
  - Izdelek je zasnovan z znanimi parametri.
  - Vsem komponentam je dodeljena številka.
  - V večini primerov ni potreben dodaten čas za izpolnitev naročila izdelka.

### 3.4 Prototipi

Kaj je prototip?

- Aproksimira končni izdelek (lahko je računalniški program) večinoma funkcionalnost in izgled.
- Po obliki pelje od skice do fizičnega izdelka oziroma verzije pred izdelavo.
- Omejitev! Poudarja ene lastnosti na račun drugih.

Zakaj potrebujemo prototip?

- Želimo preveriti rešitev.
- Reduciranje tveganja, večanje možnosti uspeha.
- Kalkulacije časa in stroškov.
- Dvig kakovosti izdelka.
- Vizualizacija konceptov.
- Funkcionalni testi.
- Predstavitev izdelka.



Pred izdelavo prototipa si moramo zastaviti 5 osnovnih vprašanj:

1. **ZAKAJ ?** – definicija namena.

- (interno) tehniška izvedljivost – preverjanje ali rešitev deluje; uporaba novih materialov; ključno pri kompleksnih izdelkih, kjer se ne moremo zanesti le na znanje in intuicijo; večinoma se izvede le ključni del za preverjanje; del sistema v katerega imamo najmanj zaupanja.
- (eksterno) komunikacija o rešitvi – prepričevanje drugih, da je ideja dobra (vodstvo, investitorji naročniki); ugotavljanje odziva, sejmi – izpostavljenost kritični publiki, tržne raziskave; večinoma je izgled primarnega značaja.

2. **KAJ ?** – definiramo kaj bo aproksimirano ali poenostavljeno in je posledica namena.

3. **KAKO ?** – določimo obliko, metodo.

- Skice, računalniški modeli, fotorealistične slike, simulacije ...
- Orodja: ročna izdelava, slike, NC, material (guma, silikon, les, pena).
- Virtualni Prototip – vedno bolj pogosto.

4. **KDAJ ?** – časovni roki in stroški.

- Upravičenost; stroški izdelave prototipa so skoraj vedno večji od stroškov izdelave končnega izdelka.

5. **UČINEK ?** – določimo teste in zelene rezultate.

- Vsi, ki imajo opravka s prototipi morajo dobro poznati namen (oblika, funkcije) in aproksimacije (material, masa...).
- prototip mora imeti možnosti testiranja zelenih funkcij (oblike, reakcija naročnika...).

Večja ko je kompleksnost izdelkov, več prototipov je potrebnih (iterativnost razvoja). Veliko vlogo ima nivo oziroma faza konstruiranja. Pri prilagoditvenem konstruiranju ne pričakujemo presenečenj in fizični prototipi večinoma niti niso potrebni. Pri inovativnem konstruiranju in konstruiranju na novo pa lahko imamo cele serije različnih poizkusov in testov, večkrat je potrebno ponoviti vse navedene tipe prototipov. 3D modeli so

omogočili predstavitev virtualnih izdelkov, ki omogočajo še bistveno več: prikaz poljubnih prerezov, senčenja, upodabljanja, numerične simulacije, virtualno izdelavo, ...).

Osnovna delitev prototipov:

- **Virtualni prototipi** – predstavitev modela v digitalnem svetu; oblikovanje izdelka v CAD sistemu in predstavitev na zaslonu ali s sistemi navidezne resničnosti, lahko tudi mešane resničnosti; virtualni prototipi imajo matematičen opis, so komponentno orientirani, detajlirani; potrebno je več časa za trening osebja, več časa za modeliranje in prenose med sistemi vizualizacije (upodabljanje); več časa in znanja je cena za natančen 3D model izdelka (virtualni model).
- **Fizični prototipi** – predstavitev izdelka v realnem svetu (otipljivem); v nasprotju z virtualnim ni večinoma precizno definiran, konceptna faza razvoja, preverjanje, verifikacija posameznih delnih rešitev; izvedba je stroškovno intenzivna, potrebujemo zelo kakovostno osebje za izdelavo v strojnem parku.

Tehnologije hitre izdelave fizičnih prototipov z večinoma dodajnimi tehnologijami omogočajo analizo funkcionalnosti ključnih delov ali celotnega sklopa, preverjanje oblikovanja, ergonomске analize in druga funkcionalna preverjanja. Dodajne tehnologije so se pojavile kot ključne tehnologije, ki so omogočila skrajšanje razvojnega časa za približno 60% glede na klasičen način. Kot primer: za razvoj avtomobila je bilo pred 10 leti potrebnih približno 60 mesecev, zdaj je čas razvoja v povprečju skrajšan na 18 mesecev. Tehnologije hitre izdelave prototipov z dodajnimi tehnologijami (*RP-rapid prototyping*) se uporabljajo v široki paleti industrijskih področij, za doseganje različnih ciljev, ki jim jih postavlja sodobni trg, kot so primarne zahteve po skrajšanju časa do pojava novega izdelka na trgu in znižanju cene izdelka. Ko model RP poleg geometrije in oblike vsebuje tudi druge funkcije, kot so posebne mehanske lastnosti (RP na osnovi plastike, kompozitov, kovin) ali biološke lastnosti (bio-kompatibilni materiali), potem ga je mogoče uporabiti ne le v avtomobilski proizvodnji, ampak in vesoljski industriji, pa tudi na področju gospodinjskih aparatov in biomedicine. Tako sta RP in trend zmanjševanja časa razvoja izdelka povzročila pojav tehnologij kot je hitra izdelava orodij (*RT-Rapid Tooling*) in dodajne tehnologije (*AM-Additive manufacturing*). Vse skupaj sestavljajo tehnologije integriranega pristopa RPM (*Rapid Prototyping/Manufacturing*).

Osredotočili se bomo na obratno funkcijo od digitalizacije - kjer realni, fizični model prenesemo v računalniško okolje - prenos iz digitalnega sveta v fizični svet – aditivno proizvodnjo. Opisana je samo osnovna ideja, pristop in našete najbolj znane tehnologije.

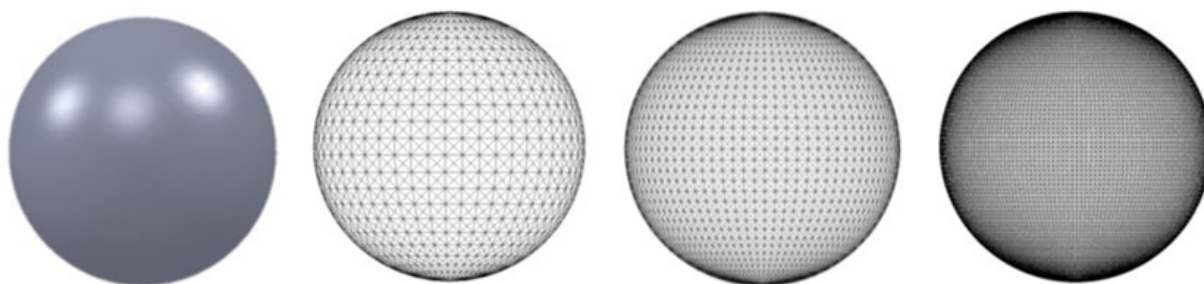
3D dodajne tehnologije je širši pojem, ki opisuje vse tehnologije pri katerih gre za dodajanje materiala. Klasične tehnologije izdelave (razen litja v kalupe) so vezane na odzemanje materiala od surovca do končne oblike. Najbolj znane tehnologije odzemanja materiala so vrtanje, struženje, rezkanje, brušenje. 3D dodajne tehnologije (*rapid prototyping, layered manufacturing, additive manufacturing*) so metode in tehnike dodajanja materiala za hitro izdelavo izdelka neposredno iz CAD modela.

Sam postopek lahko razdelimo na dva dela:

1. CAD volumski model s teselacijo modela pretvorimo v STL format - popis površja in ploskve modela s trikotniki.
2. Tehnologija izdelave: izberemo primerno tehnologijo (material, kakovost, hitrost), s čemer so definirani tudi ostali postopki: natančnost, rezanje modela na rezine (odvisno od natančnosti uporabljene tehnologije), kreiranje podpor, sama izdelava in naknadna končna površinska obdelava (odstranjevanje podpor, utrjevanje materiala, brušenje, barvanje).

Prvi del je izvedba v sistemu CAD, drugi je odvisen od izbrane tehnologije izdelave.

STL (*standard tessellation language*) je format zapisa, ki uporablja aproksimacijo za opis površja objekta s trikotniki. Natančnost je odvisna od velikosti trikotnikov (imajo normalo za določitev notranjosti objekta). Objekt je definiran kot zbir ploskev (trikotnikov), ki ga omejujejo v prostoru. STL je standarden izhodno-vhodni format zapisa (vseh) CAD sistemov in tudi drugih grafičnih sistemov, ki uporabljajo 3D modele.

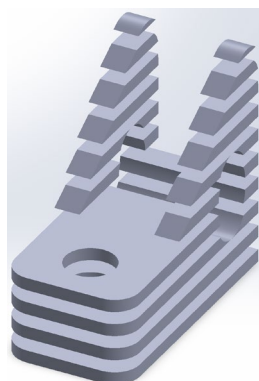


Slika 15: Predstavitev krogle v CAD in različni zapisi v STL (od manj do bolj natančnega).

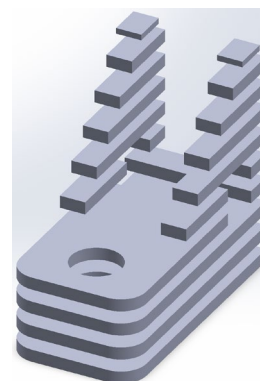
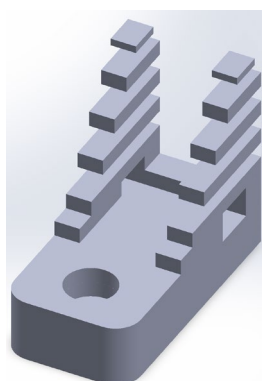
Osnovna ideja postopka dodajnih tehnologi je predstavljena na naslednji sliki.

**PROCES  
REZANJA**

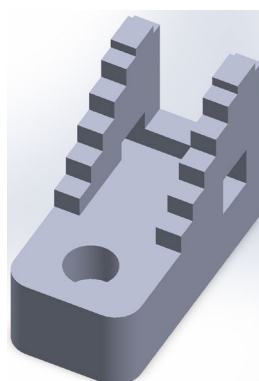
CAD model



razrez modela na rezine

popravljanje robov rezin -  
ravnanje**PROCES  
TISKA**

tiskanje rezin in spajanje



natisnjen model



naknadna obdelava površin

Slika 15: Osnovna ideja 3D dodatnih tehnologij.

Dodajne tehnologije pri sestavljanju plasti od spodaj navzgor potrebujejo v procesu prehoda preko previsov izdelavo podpor (slika 16) in poznavanje materiala in tehnologije je bistveno za pravilno kreiranje podpor. Najbolj enostavno je to prikazati na previsu, če ga želimo izdelati potrebujemo podporni material, ki to omogoča. Hkrati je potrebno povedati, da v večini nikoli ne izdelujemo polnih objektov (preveč materiala), temveč znotraj objekta tvorimo satovje. Izvedba podpor je vezana na poznavanje materiala, tehnologije in znanja.



Slika 16: Shematski prikaz podpornega materiala pri previsu in kreiranje podpor (Formlabs).

Dodajne tehnologije imajo veliko prednosti

- Ne potrebuje kalupov ali predhodne obdelave (lahko direktno izdelamo kalupe).
- Izdelamo lahko več delov hkrati.
- Izdelamo lahko različne velikosti objektov.
- Izdelamo lahko zelo kompleksne geometrije.

Vsekakor je potrebno med dodajnimi tehnologijami ločiti med:

- Hitra izdelava prototipov: generiranje demo kosov ali komponent za verifikacijo koncepta.
- Dodajna proizvodnja: uporablja se kot proizvodni proces za ustvarjanje popolnoma funkcionalnih končnih komponent iz visokotehnoloških materialov za nizko serijsko proizvodnjo z visoko dodano vrednostjo.

V dodajnih tehnologijah poznamo osnovni trikotnik kompromisov med hitrostjo izdelave, velikosti volumna objekta in natančnostjo izdelave (tudi hitrost-cena-kakovost).

Najbolj znane tehnologije:

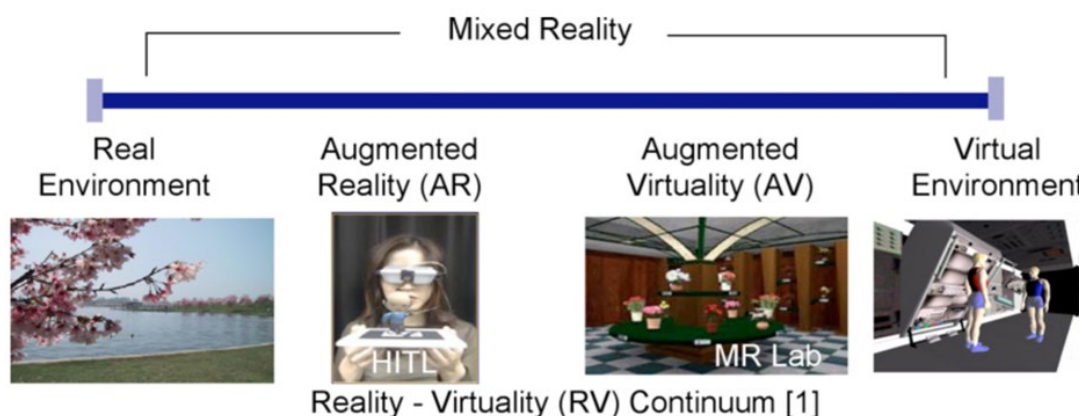
- *Stereolithography (SLA, STL)*
- *Selective Laser Sintering (SLS)*
- *Fused Deposition Modeling (FDM)*

### 3.5 Virtualno okolje

Naravno nadaljevanje 3D računalniške grafike so nove in nove tehnologije navidezne resničnosti (*VR-Virtual Reality*) z naprednimi vhodno-izhodnimi napravami, ki so se v zadnjem desetletju intenzivno razvijale in uporabljajo v vodilnih svetovnih raziskovalnih centrih. Preko VR tehnologije se ustvari umetno virtualno okolje, v katerem je omogočena 3D predstavitev izdelka, orodja, procesa v realnem času, v zelo realnih pogojih in v interakciji z uporabnikom. Interakcija prispeva k občutku prisotnosti in vključenosti v umetno virtualno okolje, v katerega je uporabnik postavljen. Uporabnik vidi in manipulira z grafičnimi objekti v naravnem razmerju, saj ima oblikovalec v VR okolju občutek resnične interakcije z modelom izdelka in procesa, ki je lahko naravne velikosti. To je še posebej pomembno v fazi podrobnega načrtovanja izdelka, virtualne montaže sklopov ali pri preverjanju karakteristik kompleksnih izdelkov v industriji (letalska, avtomobilska, vesoljska, ...). Pomembne aplikacije VR tehnologij najdemo tudi v biomedicini za

diagnostične dejavnosti in pred-kirurške analize s 3D predstavitvijo virtualnih modelov, generiranih na podlagi CT posnetkov pacientovih notranjih organov. Še širšo uporabo VR sistemov lahko pričakujemo v prihodnosti, ko bodo odpravljene vse pomanjkljivosti, ko bo tehnologija bolj prilagojena tudi z vidika programske in strojne podpore, pa tudi ko bodo v ključnih skupinah preseženi nekateri konservativni načini poslovanja za uvajanje VR tehnologije v prakso.

Osnova virtualnih prototipov je večinoma geometrija iz sistemov CAD za popolnoma virtualno okolje, lahko pa v realno sliko, na primer prenos kamere, dodajamo digitalne elemente, če naštejemo le ob skrajnosti virtualnih okolij. Po definiciji so virtualna okolja cel spekter od realnega okolja pa do popolnoma navideznega okolja.



Slika 17: Spekter okolij

Vir: [Milgram, P., & Kishino, F. (1994). A taxonomy of mixed reality visual displays. IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems, E77-D(12), 1321–1329.]

*Augmented reality (AR)*: projicira virtualne objekte v realno okolje. Prva uporaba je prenos tekem na TV in dodatek digitalnih informacij o času, rezultatu, statističnih podatkih. Dosegljiva je že z modernimi telefoni, s posebnimi očali je še boljše (Google Glass). Najbolj znani splošni aplikaciji sta gotovo *Pokemon Go* in *Ikea augmented reality*. Aplikacije imajo zelo omejene možnosti tehnologij prikazovanja, predvsem percepcijo globine. Uporablja se:

- Uporaba v industriji (vzdrževanje, design, trening, ...).
- Aplikacije (igre, navigacija v prostoru, design interierja, oglasi, ...).
- Izobraževanje (predvsem medicina).

*Mixed reality (MR)*: dodaja virtualne objekte v realno okolje. Kot vidimo na sliki 17 se ta okolja delijo na količino kreiranega in realnega okolja v skupno okolje, oziroma katero okolje tvori osnovo sistema. Če je osnova realni svet so v realno okolje projicirani virtualni



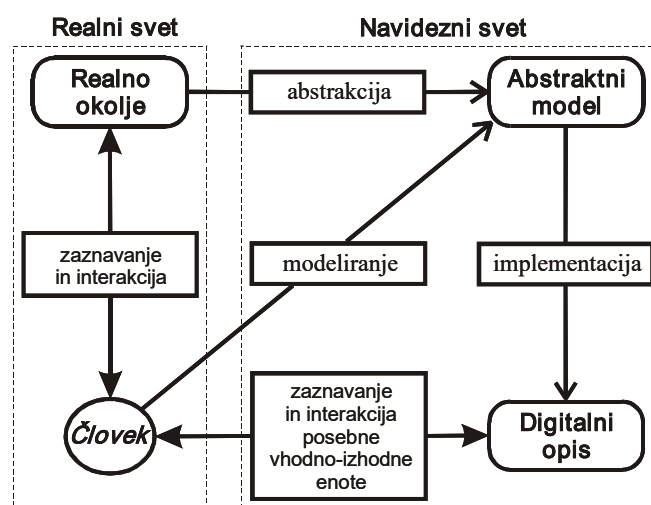
objekti, ki so tudi interaktivno aktivni. Tej obliki rečemo tudi izboljšani AR (Microsoft HoloLens). Če je osnova virtualni svet, je digitalno okolje pozicionirano v realni svet in nadomešča ali pokriva realne objekte.

*Virtual reality (VR)*: vključi uporabnika v popolnoma umetno digitalno okolje kreirano z računalnikom, ki mogoča navigiranje, uporabo zvoka, interaktivnost. Uporabnik ima dostop do virtualnega okolja s pomočjo vmesnikov, kot so projekcijski zasloni v kombinaciji z očali, pa tudi posebna očala povezana na računalnik (Oculus Rift) ali računalniško konzolo (PlayStation VR) ali samostojne naprave (Google Cardboard).



Slika 18: Primeri VR na Inštitutu za energetiko, Fakultete za energetiko.

Na splošno lahko trdimo, da je trend informacijskih tehnologij interaktivna vizualizacija. O navidezni resničnosti bomo navedli še nekatere značilnosti. V osnovi gre za odnos med realnim in navideznim svetom, relacije med njima so prikazane na naslednji sliki.



Slika 19: Relacije med realnim in navideznim okoljem.

## **Definicija navidezne resničnosti:**

Navidezna resničnost je računalniški sistem, ki ga uporabljamo za kreiranje umetnega okolja v katerem ima uporabnik občutek, da je del tega okolja, da lahko v njem funkcionira in manipulira z objekti v tem okolju."

Značilnosti navideznega okolja, ki ga omogočajo vmesniki med računalnikom in uporabnikom so: hitro in natančno sledenje v kontroliranem okolju (lažje kot v AR), 3D stereoskopski prikazovalniki in široko polje pogleda.

## **Vključenost – *Immersion* („*feeling of being there*“)**

Nivo občutka, da je navidezno okolje realno ali dovolj realistično. O 100% vključenosti govorimo, ko uporabnik ne loči več ali je navidezno okolje realno ali ne; glavni faktorji so čas upodabljanja, zakasnitev sledenja, simulacija fizikalnih zakonov, detekcija kolizij, ločljivost slike, kot gledanja, stereoskopska in globinska slika, zvočni učinki, ostali učinki (hrapavost, toplota, vonj, okus,...)

## **Prisotnost - *Presence***

Subjektivni nivo občutka prisotnosti v navideznem okolju; prezentacija uporabnika (večinoma le roka, *avatar*); uporabnik se lahko identificira z lastnim gibanjem.

## **Interaktivnost – *Interactivity***

Interaktivno poseganje v virtualni prostor; proženja dogodkov, navigiranje, ...

## **Sledenje - *Position tracking***

Je lahko aktivno (oddajanje in sprejemanje hkrati (mehanske, magnetne, GPS, WIFI, Bluetooth) ali pasivno (notranji senzorji, kompas, žiroskop, meritve pospeška, optični senzorji (markerji ali prepoznavanje zunanjih posebnosti); ali hibridno s kombinacijo aktivnega in pasivnega sledenja.

Virtualni prototipi so vedno bolj neizogiben del razvoja izdelkov, ki omogočajo vizualizacijo izdelka, analizo njegove funkcionalnosti in izdelovalnih lastnosti pred izdelavo, oceno vpliva posameznih parametrov na lastnosti izdelka, ki so definirani v zasnovi.



### 3.6 Računalniško podprti inženiring

Računalniško podprti inženiring (*CAE-computer aided engineering*) sestavljajo predvsem v naslednjem poglavju opisane računalniške aplikacije in sistemi namenjeni simulacijam: trdnostni preračuni konstrukcij, predikcija obnašanja tekočin, gibanja mehanizmov, in veliko drugih.

Ko govorimo o mehaniki, lahko ugotovimo, da je del fizike, ki proučuje učinek sil in energije na telesa. Hkrati je praktična aplikacija v znanosti o konstruiranju, oblikovanju, delovanju sistemov ali naprav, kot so stroji in strukture.

Danes mehaniko delimo na:

- **teoretsko** – osnovni zakoni in principi.
- **eksperimentalno** – iz teorije, aplikacij in simulacij: testi in opazovanja.
- **računsko** – numerične metode in računalniške simulacije.

Mehanske lastnosti konstrukcij že stoletja rešujemo z analitičnimi metodami. Po teoriji mehanike kontinuuma lahko snov neskončno krat razdelimo, pa bo imela še vedno enako strukturo. Mehanika kontinuuma temelji na konceptu neskončno malega (infinitesimalnega) delca snovi, ki ima enake lastnosti kot celota in v okolici vsakega delca snovi so vedno sosednji delci snovi. Zelo striktno gledano mehanika kontinuuma spregleda sestavo snovi, saj snov ni kontinuum, nekaj popolnoma zveznega, kontinuiranega. Sama teorija obstaja že 200 let in obravnava obnašanje snovi pri različnih obremenitvah in lastnostih po posplošenih principih, ki veljajo za vse vrste snovi:

- Fizikalni zakoni in
- matematični popis za vsako točko snovi v diferencialni obliki (in majhen volumen snovi v integralni obliki).

Računsko (računalniško) rešujemo fizikalne probleme mehanike kontinuuma z uporabo numeričnih metod. Uporabljamo jih za probleme s kompleksno geometrijo, kompleksno obremenitvijo in/ali kompleksnimi (nelinearnimi) lastnostmi materiala, kjer je težko ali večinoma nemogoče doseči rešitev po analitični metodi. Numerične metode temeljijo na aproksimacijah (poenostavitve) in iteracijah (ponavljanje); ker jih je ogromno, potrebujemo zmogljive računalnike.

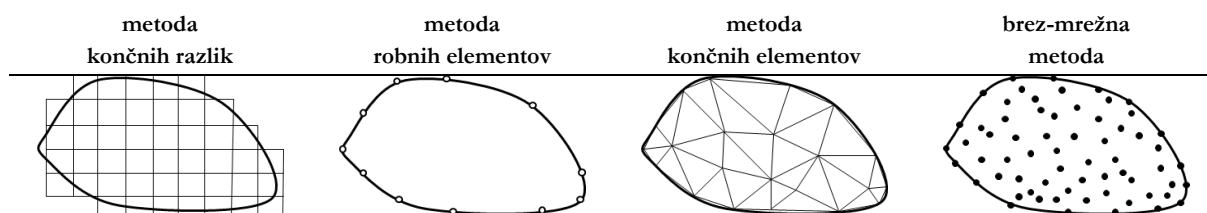
Fizikalne pojave modeliramo s pomočjo diferencialnih enačb, večina katerih je prekompleksna za analitične metode reševanja. Uporabljajo numeričen pristop pri reševanju diferencialnih enačb z aproksimacijo.

Osnova numeričnih metod je **diskretizacija domene** in posledično diskretizacija fizikalnih in matematičnih lastnosti. V odvisnosti od načina diskretizacije so razvita tudi matematična orodja za popis fizikalnih lastnosti.

- Domeno razdelimo na končno število kontrolnih točk ali manjših elementov.
- Komplekse probleme rešujemo z delitvijo na manjše in enostavnejše elemente, ki jih lahko rešimo z uporabo matematičnih orodij, večinoma s pretvorbo iz diferencialnih enačb v sisteme algebrskih enačb.
- Rešitev celotnega problema je sestavljanje (superpozicija) rešitev po posameznih elementih.

V numeriki uporabljamo različne diskretizacijske metode, odvisno od problema, od razpoložljivega programja, od računalniških resursov, poznavanja in znanja. Najbolj znane in najbolj pogosto uporabljene so:

- Finite difference method – FDM - Metoda končnih razlik.
- Finite element method – FEM - Metoda končnih elementov.
- Boundary element method – BEM - Metoda robnih elementov.
- Finite volume method – FVM - Metoda končnih volumnov.
- Mesh-free (meshless) method – brez-mrežne metode.



Slika 20: Različne diskretizacijske metode.

Seveda diskretizacijska metoda z delitvijo na elemente definira tudi relacije in enačbe, ki sledijo tej metodi in povezujejo komponente in matematično opisujejo fizikalne zakone in lastnosti snovi.

Za različne metode imamo na voljo različna programska orodja (licenčna), ki omogočajo izvajanje simulacij in analiz, od kreiranja geometrije do prikaza in analize rezultatov. Nekako lahko ugotovimo, da lahko programska delimo na tri specifična področja. Programska orodja za simulacije, ki so direktno povezana in dosegljiva v sistemih CAD, specializirana programska orodja (že imajo zgodovino razvoja), ki so na trgu kot samostojna programska orodja in orodja v oblaku, ki sledijo razvoju oblachnega računalništva (*cloud computing*) in paradigmi Industrije 4.0 – SaaS (*Software as a Service*).

### 1. Numerične simulacije znotraj sistemov CAD (SolidWorks, Autodesk, ...)

- Splošna funkcionalnost, prenos geometrije je enostaven ali nepotreben; spreminjanje geometrije iterativno.
- Omejeni tipi simulacij (večinoma samo linearni).
- Omejena uporaba tipov elementov in omejeno število elementov (velikost problema).
- Omejeni tipi obremenitev in podpor (večinoma enostavni).
- Cenovno ugodno in enostavno za uporabo.

### 2. Specializirana programska oprema (Ansys, Abakus, Nastran, Patran, ...)

- Večinoma nujen prenos geometrije iz sistemov CAD (IGES, STEP, STL, ...)
- Robustnost in veliko tipov simulacij (Nonlinear, Fatigue, Metaphysics).
- Fokusirane na kakovost analiz manj na oblikovanje in design.
- Bistveno bolje definiranje mrež, obremenitev in podpor.
- Dražja licenčna in manj uporabniško prijazna (se izboljšuje).
- Potrebuje zelo dobro strojno opremo (beri CPU, RAM, SSD).

### 3. Programska oprema v oblaku (Onshape, SimScale)

- Po lastnostih enaka specializirani.
- Oprema se najema za čas, ko se uporablja (ni licenčnine).
- Za strojno in programsko opremo je poskrbljeno v oblaku.
- Zahteva kakovostno spletno povezavo.
- Problem varnosti podatkov in rezultatov.

Na splošno lahko rečemo, da je integrirana programska oprema (CAD in simulacije) enostavna za uporabo, a zelo omejena s kakovostjo in tipi simulacij. Specializirana programska oprema je dražja in zahteva kakovost strojne opreme, pa tudi več znanja in izkušenj pri uporabi. Programska oprema v oblaku se v zadnjem času izredno hitro razvija, njena največja slabost je pravzaprav varnost. Moramo še dodati, da je mogoče v zadnjem času tudi specializirano programsko opremo zakupiti (licenco) za krajši čas (na primer 3 mesece).

### 3.6.1 Numerične simulacije – metoda končnih elementov

Metoda končnih elementov (*FEM – Final Element Method*) je najbolj pogosto uporabljena in komercialno najuspešnejša numerična metoda predvsem za področju trdnostnih simulacij.

Analitične analize o trdnostnih lastnostih teles po teoriji mehanike kontinuuma izvedemo z velikimi poenostavitvami, ko so:

- Masa elementa je koncentrirana v težišču.
- Nosilci so poenostavljeni v linije z enakomernim presekom.
- Geometrijske posebnosti upoštevamo s korekcijskimi faktorji pridobljenimi z laboratorijskimi eksperimenti.
- Konstrukcije so izvedene na osnovi kalkulacij idealiziranih struktur in velikega faktorja varnosti (1,5-3 tudi 7) na osnovi izkušenj.

Z vključevanjem velike računske moči računalnikov so se razvile računske simulacije na osnovi teorij numeričnih analiz. Ker gre za diskretne sisteme prav tako potrebujemo poenostavitve in aproksimacije vendar so le-te drugačne. Računska geometrija in obremenitve so lahko bistveno bolj kompleksne, zahteve po natančnosti so bistveno višje. Seveda potrebujemo za izvajanje simulacij in analiz, razen dobrega računalnika in programskih orodij, tudi:

- Znanje o fizikalnih lastnostih kompleksnih objektov (napetosti, prenos toplote, tok tekočin).
- Razumevanje poenostavitev in njih učinek na obnašanje objekta; izračun varnosti; prepoznavanje šibkih točk, „vrednotenje rezultatov“.
- Zaupanje v svoje znanje.

Zakaj se konstrukcije porušijo?

- Zelo pogosto, se med obratovanjem zgodijo porušitve posameznih komponent.
- Porušitev je posledica nestabilnosti komponente med obratovanjem.

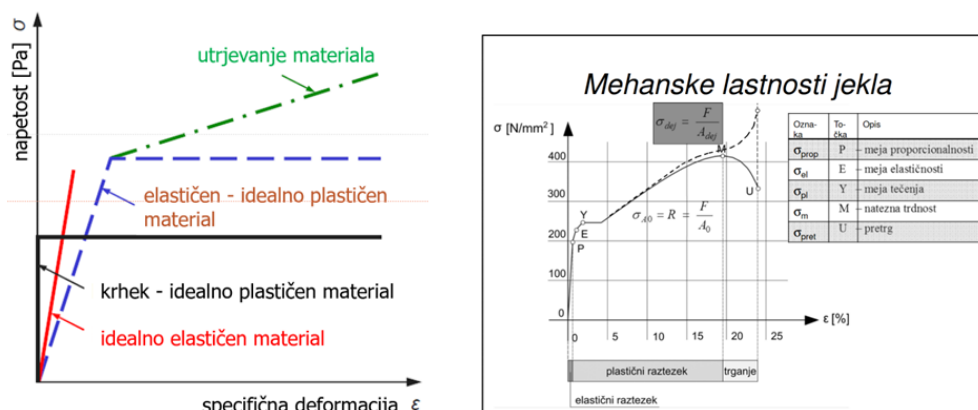
Glavni razlogi za porušitev:

- Nepravilna zasnova, izbira materiala, ocena obremenitve, ...
- Nepravilna izdelava.
- Nepravilna uporaba.

Tipi porušitev (tudi tipi simulacij):

- Preobremenitev (Yielding) porušitev, trajna deformacija.
- Uklon (Buckling) velika elastična deformacija.
- Zlom (Fracture) zlom komponente.
- Utrujenje (Fatigue) zlom zaradi ponavljajoče se obremenitve.
- Lezenje (Creep) deformacija, ki se s časom akumulira.
- Korozija (Corrosion) izguba lastnosti materiala vsled kemičnih reakcij.
- Obraba (Wear) poškodba površine zaradi stika ali drgnjenja.

Materialne lastnosti med obremenitvijo povezujeta koncepta napetosti ( $\sigma$ ) in specifičnih deformacij ( $\epsilon$ ) in po Hookovem zakonu preko Youngovega modula (E) in Poissonovega števila ( $\nu$ ). Na sliki 21 so najprej idealizirane lastnosti materiala v diagramu  $\sigma$ - $\epsilon$ , zraven je diagram  $\sigma$ - $\epsilon$  za najpogostejši konstrukcijski material – jeklo.



Slika 21: Idealizirane mehanske lastnosti materialov in realne mehanske lastnosti jekla.

Vir: prirejeno po Jerman: Varnost v strojništvu.

Rezultati numeričnih analiz so pomiki, napetosti in specifične deformacije in za odločitev o stanju materiala pod določenimi obremenitvami potrebujemo referenčno vrednost – porušitveni kriterij.

Najpogostejši porušitveni kriterij je vonMises, ki predstavlja napetostno stanje v neki točki z uteženo kombinacijo vseh napetosti:

- Normalnih in strižnih

$$\sigma_{vm} = \sqrt{0.5 \left[ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 \right] + 3 (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}$$

- Glavnih

$$\sigma_{vm} = \sqrt{0.5 \left[ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]}$$

Za izračun in primerjavo je zelo uporabno, da 6 vrednosti napetosti skombiniramo v eno vrednost, ki predstavlja napetostno stanje  $\sigma_{vm}$ . Po teoriji začne elastični material popuščati ko  $\sigma_{vm}$  doseže dopustno napetost  $\sigma_{dop}$  – *Yield stress*.

Drug porušitveni kriterij je primerjava dopustne napetosti z maksimalno glavno napetostjo, ki jo uporabljamo predvsem za krhke materiale, ki nimajo specifične točke popuščanja, in pri čistem strigu.

Pri obeh porušitvenih kriterijih govorimo o varnostnem faktorju, ki je količnik med dopustno napetostjo, ki je lastnost materiala in napetostjo porušitvenega kriterija:

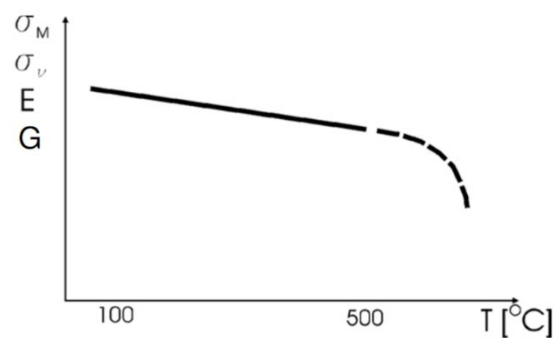
$$\text{varnostni faktor (factor of safety) FOS} = \frac{\sigma_{dop}}{\sigma_{vm}}$$

Numerično po FEM ne obvladujemo le trdnostnih preračunov temveč tudi:

- Frekvenčne analize: Vsaka konstrukcija ima tendenco vibrirati pri določenih „lastnih“ frekvencah v določeni obliki. Če je konstrukcija z obremenitvami vzbujena blizu lastnih frekvenc sledijo veliki pomiki (resonanca) in napetosti. Nedušene konstrukcije pri

rezonanci teoretično dosegajo neskončne pomike, dušenje pa omeji gibanje. Če poznamo lastne frekvence, se lahko rezonanci izognemo.

- Uklon: Vitke konstrukcije se ob tlačni obremenitvi v aksialni smeri uklonijo. Uklon je velika deformacija zaradi nenadne spremembe akumulirane energije uklona (membranski efekt). Uklon je lahko različnih oblik (*mode shapes*). Večinoma nas zanima pojavna oblika pri najnižji kritični obremenitvi.
- Nelinearni primeri so posledica nelinearnosti: materiala, kontakta, velikih pomikov. Vključuje različne lastnosti materiala pri različnih obremenitvah in podpira statične in dinamične obremenitve (*fatigue*) in lezenje (*creep*).
  - Nelinearna geometrija – zaradi deformacij in napetosti se oblika spreminja in s tem tudi togost.
  - Nelinearna obremenitev – obremenitev se v času spreminja po velikosti in smeri ali je kombinirana (sila + temperatura).
  - Nelinearni robni pogoji – vključujejo tudi komponente, ki so v stiku in povzročijo nesorazmerne spremembe pomikov in deformacij.



Slika 22: Prikazuje spreminjanje lastnosti jekla z višanjem temperature.

Vir: prirejeno po Jerman: Varnost v strojništvu.

Simulacije v osnovi delimo na linearne in nelinearne.

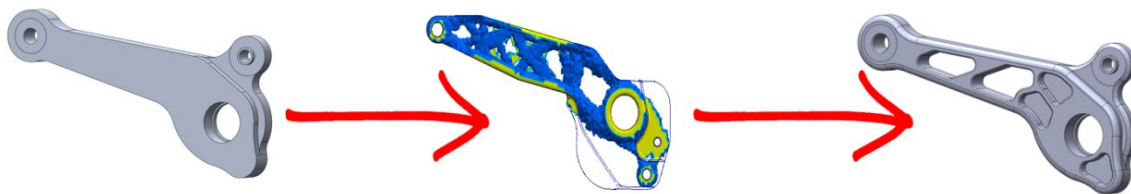
Linearne:

- Elastične deformacije.
- Majhne spremembe oblike objekta.
- Ni sprememb v smeri in velikosti obremenitve.
- Ni sprememb v lastnostih materiala.
- Majhne napetosti in specifične deformacije.

Ne-linearne:

- Spremembe geometrije vplivajo na trdnost in togost.
- Deformacije (neelastične, ni vračanja v prvotno obliko).
- Spremembe smeri obremenitev ali spreminjanje podpor.
- Krivulje obremenitev ali lastnosti materiala.

Numerične simulacije omogočajo bistveno bolj sistemski pristop pri razvoju izdelkov. Le redko simuliramo celotne izdelke, večinoma analiziramo kritične komponente (lastna presoja). Analize vodijo vedno tudi v optimiranje konstrukcije glede na dane robne pogoje, na primer: »Poišči obliko model z minimalno maso (manj materiala), kjer napetosti ne presegajo dovoljene meje materiala in je lastna frekvenca 2x večja od resonančne.« Postopek imenujemo topološko optimiranje. Praviloma je optimalna oblika geometrijsko bistveno kompleksnejša in pri končni odločitvi je potrebno dobljeno geometrijsko obliko uravnotežiti z možnostjo izdelave. Na sliki je prikazan primer topološke optimizacije na podlagi rezultatov analiz.



Slika 27: Primera optimiranja geometrije izdelka na podlagi simulacij.

Vir: SolidWorks Instructor's Guide

Postopek simulacije lahko poimenujemo **PpP** in predstavimo s tremi osnovnimi fazami:

**Pp** – *Pred-procesiranje* – določitev tipa analize, definicija geometrije FEM modela, določanje lastnosti materiala, določanje robnih pogojev in kreiranje mreže končnih elementov.

**p** – *procesiranje* – reševanje sistema enačb.

**pP** – *Po-procesiranje* – pregled in analiza rezultatov.



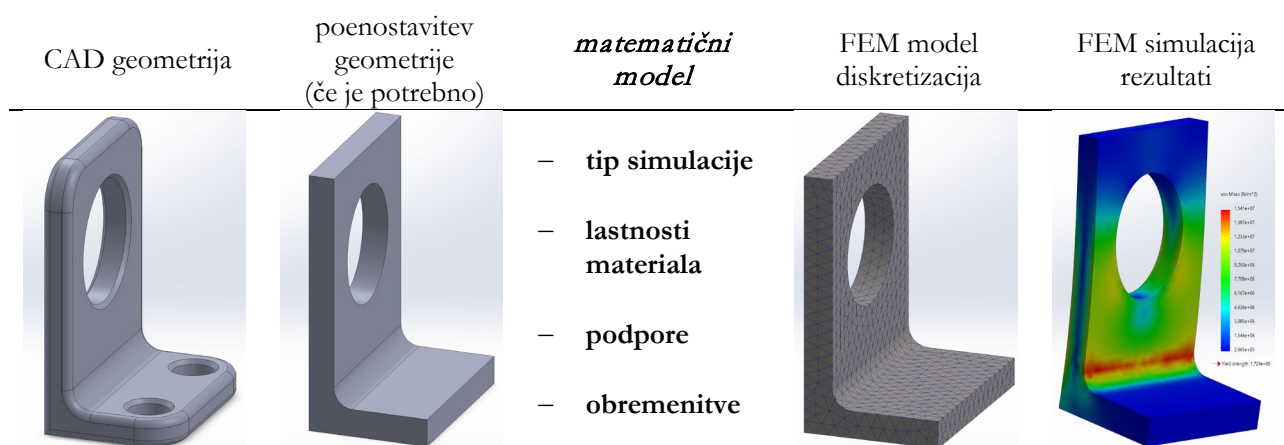
## Pp – pred-procesiranje

Izdelava FEM modela določitev ciljev in tipa simulacije, geometrije interesnega področja – domene.

FEM model ni enak CAD geometrijskemu modelu. FEM model se mora obnašati kot realni model, ni pa nujno, da izgleda kot realni model. Za izdelavi FEM modela so potrebni znanje in izkušnje.

- CAD model vsebuje tudi podatke za izdelavo (tolerance, luknje za vijake, obdelava površine, varni spoji, ...), ki so za simulacije večinoma nepotrebni. Če so podatki za izdelavo potrebni vključimo najslabši možni primer (toleranco).
- FEM model ima idealizirane lastnosti realnega modela, kar ne pomeni, da izgleda kot realni objekt ampak se obnaša kot realni objekt.
- Učinkovit FEM model je idealiziran CAD model (izpuščanje majhnih detajlov, zaokrožitve) velikokrat je zelo poenostavljen (iz 3D v 2D zaradi simetrij, uporaba lupine, ...).
- Osnovno vodilo: »Uporabi najenostavnejši možni model, ki še vodi do realnih rezultatov na interesnem področju z minimalnimi stroški preračuna.« je mogoče uporabiti ob dobrem poznavanju posameznega primera.

Na sliki 24 je prikaz realne geometrije in poenostavljene geometrije FEM modela. Za poenostavljanje modela moramo poznati tip simulacije in obremenitve, da vemo, katere dele geometrije lahko poenostavimo ali zanemarimo, in kako bo ta poenostavitev vplivala na rezultat.



Slika 24:: Postopek PpP – od CAD modela do FEM rezultatov.

## Predpisovanje fizikalnih lastnosti

So vezane na materialne lastnosti objekta simulacije. Geometrija je vezana na vsaj eno fizikalno lastnost, če je več fizikalnih lastnosti morajo biti kompatibilne. Večina fizikalnih lastnosti definiramo v 3D, nekatere v 2D. Večinoma pri analizah uporabljamo homogeno polno telo kot dovolj realistično za simulacije.

Fizikalne lastnosti poenostavljamo in so vezane na točno določene simulacije; z njimi zmanjšujemo velikost domene in/ali potrebne računske čase. Veliko konstrukcijskih problemov lahko rešimo kot linearne statične probleme, ki temeljijo na naslednjih predpostavkah:

- Majhne deformacije (obremenitev se zaradi pomikov ne spremeni).
- Elastično področje (ni plastičnosti, ni porušitve).
- Statična obremenitev (obremenitev je stalna ali se spreminja zelo počasi).

## Linijske fizikalne lastnosti; rešujemo le eno dimenzijo; prirejene enačbe

Objekt predstavljamo z linijo (težiščnica) in imajo konstanten prerez, ki ni enodimenzionalen, zato je pomembna tudi orientacija prereza glede na linijo.

Poznamo dve vrsti linijskih modelov: palice in nosilce.

Palica (*truss* ali *bar*):

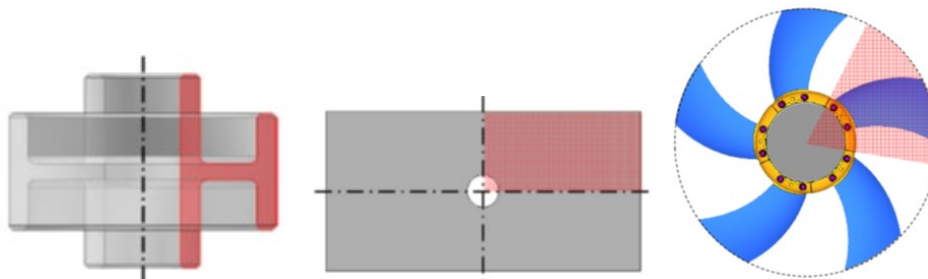
- prenaša le linijsko obremenitev (natezno ali tlačno);
- prerez je okrogel in
- edina potrebna podatka za analize sta površina prereza in lastnosti materiala.

Nosilec (*beam*): bistveno bolj zahteven element

- prerez je lahko poljuben in ima površino, izračunani vztrajnostni in odpornostni moment;
- veliko je standardnih prerezov (profili: cevi, kvadratne cevi, I, L, ...);
- prerezi so lahko nesimetrični, zato je bistvena tudi orientacija določena z vektorjem v smeri koordinatne osi;
- prerez in material sta lahko skupna več (vsem) nosilcem;
- vsakemu predpišemo orientacijo.

## Osna-simetrija; izločimo eno dimenzijo; prirejene enačbe

Primeri so cevi, rezervoarji, s konstantnim radialnim prerezom po obodu; robni pogoji enakomerno razporejeni po obodu in simetrični na os; večinoma uporabljamo polarne koordinate; radialni prerezi se deformirajo le v radialni smeri; zaradi osne simetrije in Poisson razmerja imamo po obodu enakomerno razporejeno specifično deformacijo in napetost; modeliramo radialni prerez s površinskimi elementi; 3D v 2D; geometrija in podpore in obremenitve so osno-simetrične.



Slika 25: Primer uporabe simetrije – osne simetrije, 2x zrcalne simetrije, ciklo-simetrije - za definicijo manjše računske domene  
Vir: Mole: Računalniška analiza konstrukcij.

## Simetrija v 2D in 3D

Z upoštevanjem simetrij izrazito zmanjšujemo domeno in število elementov; da lahko problem obravnavamo kot simetričen problem morajo biti simetrični (zrcalno-simetrični, osno-simetrični) vsi elementi:

- geometrija obravnavanega območja,
- materialne lastnosti,
- predpisani robni pogoji,
- obremenitev obravnavanega območja.

Na ravninah simetrije je potrebno predpisati robne pogoje (nekatero aplikacije omogočajo, da ploskev označimo kot simetrično in same generirajo robne pogoje simetrije).

## Določitev robnih pogojev – obremenitve in podpore

Določitev robnih pogojev, obremenitev in podpor, je izredno pomembna uporabniška odločitev, ki se večinoma navezuje na tri Newtonove zakone mehanike. Obremenitve in podpore v veliki večini definiramo na geometrijske elemente (volumen, ploskev, rob ali točko) in prepustimo predprocesorju, da preračuna podane vrednosti na posamezno

vozlische na elementu. Mrežo elementov definiramo pozneje. V posebnih primerih pa definiramo robne pogoje tudi neposredno na vozlische elementov. V FEM je število prostostnih stopenj v posameznem vozlische odvisno od tipa elementa, ki ga uporabimo za mreženje.

Palice imajo samo longitudinalni pomik. 2D elementi imajo v vsakem vozlische dva pomika in nič rotacij, ker bi to pomenilo pomike zunaj ravnine. Linijski nosilec ima v vsakem vozlische vseh šest prostorskih stopenj (3 pomike in 3 rotacije). 3D element ima več vozlisch in vsakem tri prostostne stopnje. Dodatna prostostna stopnja je lahko še temperatura. Število prostostnih stopenj vseh elementov neposredno pomeni velikost togostne matrike sistema. Vsaki znani prostostni stopnji določimo vrednost pred simulacijo (na primer: pomiki v vozlische so nič, kar pomeni, da je vozlische fiksno). Vrednosti pomikov, ki jih ne poznamo so v simulaciji izračunane.

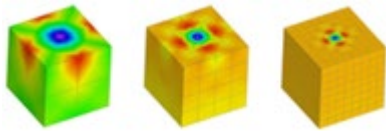
Za razliko od podpor definiranje obremenitev ni obvezno (na primer za računanje lastne frekvence). Obremenitve ločimo po:

- lokaciji (vedno DOF) lahko je točkovna ali porazdeljena po površini ali po volumnu (silo teže definiramo kot vrednot težnostnega pospeška v smeri gravitacije; enako centrifugalno silo s pospeškom v radialni smeri - statika); v programih podamo obremenitev na geometrijo (neodvisno od mreže elementov) in pozneje apliciramo v DOF vozlisch.
- obliki (sile, tlaki, momenti, pospeški, temperatura) in so lahko statične ali dinamične (posebna pozornost velja enotam).

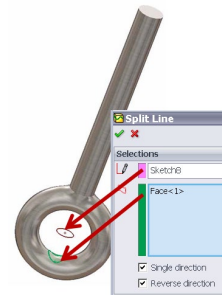
Porazdeljena obremenitev na površino je tlak, določen z rezultanto-ekvivalentno silo (N) ali obremenitvijo na enoto površine ( $\text{N}/\text{m}^2$ ); pozitivne obremenitve so tlačne, negativne pa natezne. Obremenitve v drugih smereh so vlečne (*traction*) – podati moramo smer delovanja (preveri reakcije).

Posebni primer je definicija obremenitve v točki, točka nima dimenzij – sila deluje na površino veliko 0, napetosti so neskončne in v teoriji govorimo o singularnosti. Ker pa je FEM je aproksimativna metoda z interpolacijskimi funkcijami, ki niso sposobne opisati singularne rešitve v točki in ker se vrednosti pomikov povprečijo med sosednjimi vozlische, singularnost z razdaljo od točke pada: Zato obremenitve v točki lahko uporabimo, vendar dobimo velike reakcije, ki jih pri vrednotenju rezultatov zanemarimo. Na sliki je prikazana točkovna obremenitev in manjšanje vpliva singularnosti z goščenjem mreže številom elementov.

Kadar obremenitev ni skladna z geometrijo si »priredimo« geometrijo (virtualno rezanje ploskev, robov, volumnov). Na sliki je prirejanje geometrije v SolidWorksu.




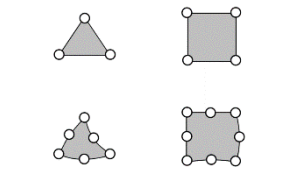
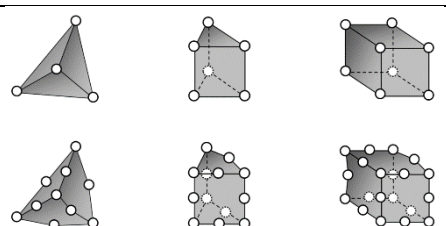
Slika 26: Manjšanje področja napetosti (singularnosti) s povečevanjem števila elementov (enterfea).



Slika 27: Kreiranje ploskve za definicijo obremenitve  
Vir: SolidWorks Instructor's Guide.

## Definicija mreže končnih elementov

Glede na tip simulacije in FEM model izberemo odgovarjajoče elemente s katerimi zamrežimo FEM model. Na sliki so najpogosteje uporabljeni linearni in kvadratni tipi elementov:

<b>1D</b>	
<b>2D</b>	
<b>3D</b>	

Slika 28: Tipi elementov v FEM (enterfea).

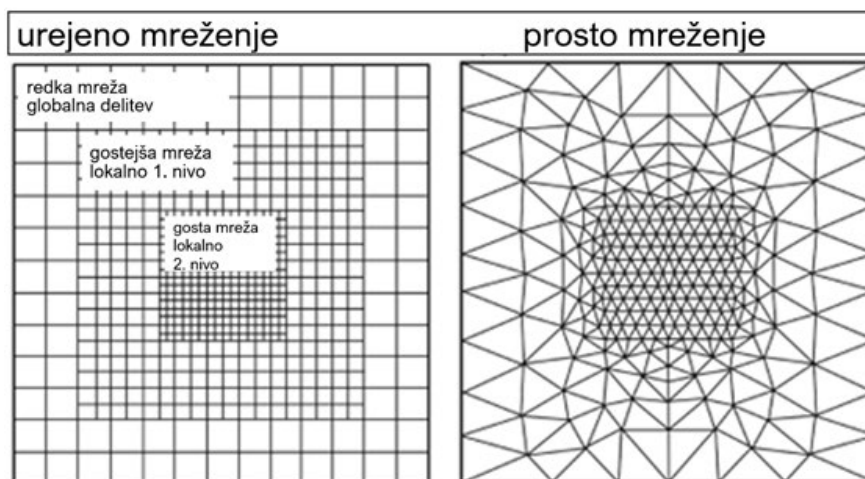
Vozlišče elementa podaja geometrijsko lokacijo v prostoru in fizikalne lastnosti (napetosti, specifične deformacije, temperaturo, hitrost, ...). Element je matematična enota, ki definira obliko in fizikalne lastnosti znotraj elementa; nekatere vrednosti so podane, ostale interpoliramo iz geometrije in fizikalnih lastnosti. Numerični model sestavljajo elementi in vozlišča – mreža elementov:

- Za elemente v vozliščih numerično rešimo enačbe (PDE, ODE);
- dobimo matriko za vsak element;
- matrike elementov sestavimo v matriko sistema;

- matriko sistema enačb rešimo;
- rezultati so vrednosti v vozliščih;
- interpoliramo jih po elementu;
- prikažemo rezultate.

Tudi načine mreženja delimo:

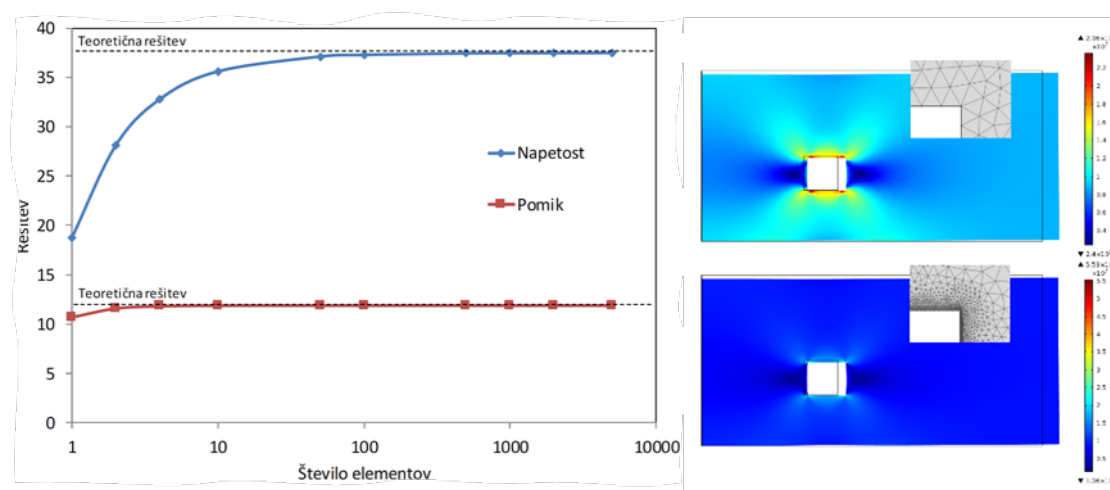
- Urejeno mreženje (*structured meshing*) – kreiranje mreže.
- Prosto mreženje (*free meshing*) – generiranje mreže.
- Hibridno mreženje (kombinacija prostega in urejenega mreženja).



Slika 29: Primer urejenega in prostega mreženja.

Na sliki 29 je objekt razdeljen v področji, na levi je primer strukturiranega mreženja z lokalnim zgoščanjem, na desni pa primer prostega mreženja, prav tako z lokalnim zgoščanjem mreže. Kakovost končne rešitve je v veliki meri odvisna od kakovosti mreže.

Popolnoma avtomatizirano (prosto) mreženje je redko zadovoljivo, večinoma uporabnik sam poskrbi za parametre mreženja z lokalnimi zgostitvami mreže, glede na želeno kakovost (natančnost) rešitve, za kar so potrebne izkušnje. Mreženje je delovno najbolj intenziven del pred-procesiranja, seveda odvisno od kompleksnosti geometrijskega modela (lahko delimo ga na enostavnejše dele). Večina sistemov pred-procesiranja uporablja dve definiciji velikosti elementov: globalno in lokalno gostoto mreže. Končna mreža končnih elementov je kombinacija predpisanih lokalnih in globalnih vrednosti velikosti elementov. Kakovost končne rešitve je neposredno vezana na število uporabljenih končnih elementov. Veliko število elementov pa pomeni veliko število enačb za izračun in veliko obremenitev procesorja in pomnilnika.



Slika 30: Odvisnost natančnosti rešitve od števila končnih elementov (enterfea).

S povečevanjem gostote končnih elementov (zmanjševanjem elementov) rezultati konvergirajo k teoretični rešitvi. Zmanjševanje velikosti elementov in velika zgostitev mreže in s tem povečevanje natančnosti je seveda omejeno, predvsem z računalniško strojno opremo (beri RAM). Ko količina podatkov presega interni pomnilnik z uporabo virtualnega pomnilnika na disku zelo upočasni delo in poveča čas procesiranja. Če količina podatkov presega oboje, mreže ni mogoče izdelati.

Redki so tako veliki in kompleksni problemi (super-računalniki) saj jih zmanjšujemo s poenostavitvami ali gostitvijo mreže do sprejemljive meje. Veliko število elementov vpliva tudi na aritmetično napako računanja (veliko število računskih operacij z zaokroževanjem). Glede na sliko 30 je sprejemljiva natančnost rezultatov večinoma relativno hitro dosegljiva.

Ker so mreže elementov na določenih mestih zgoščene, na drugih pa bistveno manj imamo seveda elemente, ki te različne velikosti povezujejo in so zato »popačeni«. Idealni element ima stranice v razmerju 1:1, kar je v mrežah težko doseči (predvsem nestrukturiranih). Kadar stranice elementov niso v idealnem razmerju (*aspect ratio*) govorimo o popačenju elementov. Zelo popačeni elementi dajejo slabe rezultate. Večina pred-procesorjev ima tudi aplikacije za preverjanje popačenosti elementov. Popačenost se računa na dva načina: ali z razmerjem med najkrajšo in najdaljšo stranico elementa, ali z razmerjem med največjim in najmanjšim notranjim kotom elementa. Če so elementi, posebej v interesnem področju zelo popačeni, jih je potrebno mrežo popraviti z drugačnimi definicijami mreženja ali vgrajenimi funkcijami za popravljanje mreže (predpišemo dovoljeno razmerje popačenosti). Pri izvajanju simulacij opravimo izračune rezultatov z več mrežami. Prva mreža je najmanj gosta – preverimo smiselnost rezultatov glede na robne pogoje in področja z večjimi obremenitvami in gradienti napetosti. Mrežo zgostimo na mestih večjih obremenitev in izvedemo simulacijo še enkrat. Vrednosti

rezultatov morajo v skladu sliko 30 konvergirati k rešitvi. Mrežo zgostimo še enkrat in izvedemo simulacijo, če je razlika med rezultati zadovoljiva, nima smisla še gostiti mrežo za izboljšanje rezultatov, ker čas procesiranja s številom elementov hitro raste. Seveda na kakovost mreže izredno vplivajo izkušnje uporabnika.

## p – procesiranje

Procesiranje je računalniško najbolj intenziven del celotnega procesa in pomeni računanje neznanih vrednosti numeričnega modela. Rešujemo sistem linearnih algebrajskih enačb z uporabo različnih numeričnih metod (direktne in interaktivne metode). Značilnosti matrike FEM je simetričnost in diagonalna pasovnost – le pas ob diagonali ima člene ki so različni od nič – zato je čas procesiranja manjši kot pri ostalih metodah. Največja (pol)širina in število neznank določata potrebno velikost RAM. Ker je matrika simetrična in pasovna so bolj primerne direktne metode.

Tabela 1 prikazuje čase računanja pasovnih matrik (brez branja in zapisovanja na disk).

Tabela 1: razmerja med velikostjo simulacije in potrebnim časom za izračun.

Red matrike N	Pomnilnik (64bit) =8NB	Čas na dober PC	Čas na superRačunalniku
$10^4$	8.MB	0,05sek	0,0005sek
$10^5$	240.MB	5sek	0,05sek
$10^6$	8.GB	8min	5sek
$10^7$	250.GB	13ur	9min
$10^8$	8.TB	58dni	16ur

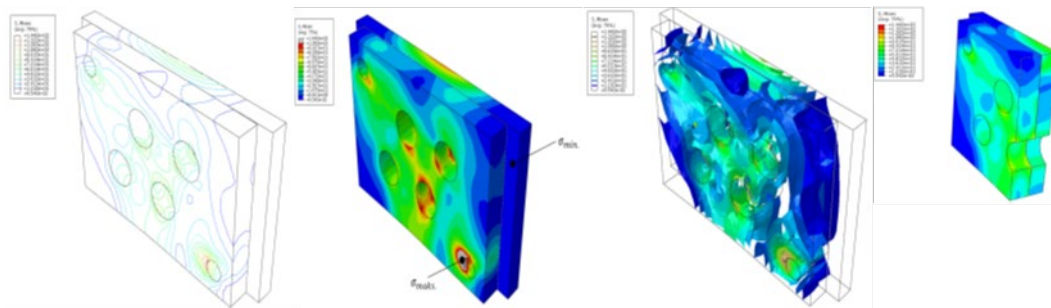
## pP – po-procesiranje

### Rezultati simulacij in njih analiza

Rezultati simulacij so vrednosti v vozliščih elementov: glavnih napetosti, primerjalnih napetosti, pomikov, momentov, reakcijskih sil, temperatur. Prikazati jih je mogoče v obliki tabel, diagramov, slik, animacij (računalniška grafika je zakon). Rezultati v obliki tabel so izredno nepregledni, zato rezultate prikazujemo s slikami deformirane strukture in v spektru barv (modro – najmanjše vrednosti; rdeče – največje; vmes pa – zeleno). Posebej je potrebno opozoriti na legendo grafa, kjer barve dobijo svoje vrednosti. V veliki večini je napetostno stanje prikazano z vonMisesovim izračunom napetosti. Velikost in razporeditev napetosti, pomikov, temperatur prikazujemo po modelu z izo-linijami (krivulje povezujejo točke enakih vrednosti), senčeno, izo-površinami, Posebej je mogoče



preveriti vrednosti v prerezih, pozicijo maksimalnih vrednosti, animacije – od nedeformiranega do maksimalno deformiranega modela.



Slika 31: Prikaz rezultatov simulacije z izo-linijami, senčeno z označbo maksimalne vrednosti, izo-površinami in prerezu. V vseh primerih je slika vedno opremljena z legendo (enterfea).

Praktični nasveti:

- Simuliraj realni svet.
- Preveri lastnosti materiala.
- Uporabljaljaj inženirsko logiko in zdravo pamet.
- Ne podajaj obremenitev v točke ali na robove.
- Pazi na pravilno izbira tipa simulacije.
- Preveri singularnosti (reakcije).
- Zagotovi konvergenco rezultatov.

### 3.6.2 Numerične simulacije – metoda končnih volumnov

Numerične simulacije tekočin – **CFD** – *comutional fluid dynamics* – so numerične metode za reševanje problemov s področja tekočin (kapljev in plinov ali kombinacije) v inženirstvu in matematični fiziki.

*COMPUTATIONAL* – računski, predvsem računalniški

*FLUID* – tekočine – kapljevine in plini

*DYNAMICS* – dinamika, gibanje in spreminjanje

V CFD večinoma simuliramo tok tekočin in plinov in prehodne faze, gretje in hlajenje, kemijske reakcije, aerodinamiko objektov, probleme turbulence, ...

Uporabljamo za probleme s kompleksno geometrijo, obremenitvijo in/ali lastnostmi materiala, kjer je težko ali nemogoče doseči rešitev po analitični metodi (kar je velika večina problemov). Tudi mehaniko tekočin proučujemo s tremi pristopi: eksperimentalno –

izvajanje zahtevnih testov; teoretsko – analitično reševanje parcialnih diferencialnih enačb in numerično – računalniško reševanje parcialnih diferencialnih enačb z metodami diskretizacije.

CFD omogoča vpogled v dogajanja, ki so kompleksna, draga ali nemogoča z uporabo tradicionalnih analitičnih metod in eksperimentov. CFD ne nadomešča eksperimentov, ampak zmanjšuje število in stroške eksperimentov.

CFD je znanost, ki napoveduje – **PREDIKCIJA** - gibanje tekočin, prenosa toplote, prenosa mase, kemijskih reakcij in podobnih pojavov z reševanjem odgovarjajočih matematičnih enačb za te procese, z uporabo numeričnih metod.

CFD omogoča kvalitativno in kvantitativno simulacijo tokov:

- Matematično modeliranje ((parcialne) diferencialne enačbe).
- Numerične metode (diskretizacija in tehnike reševanja sistemov enačb).
- Programska orodja (pPp).

CFD analize omogočajo inženirjem izvajanje „numeričnih eksperimentov“ (računalniških simulacij) v virtualnih laboratorijih, ki so komplementarni s testi in eksperimenti v laboratorijih. Razvoj CFD je bil omogočen z razvojem numeričnih metod in uporabo računalnika in razvoja HW in SW; predvsem računske moči in kakovostne računalniške grafike. Zavedati se je potrebno, da gre za diskretne sisteme predstavljene s končnim številom točk.

Če primerjamo lastnosti eksperimentov in simulacij CFD:

#### **Eksperiment**

- Ena veličina v času.
- Omejeno število točk in časovnih okvirjev.
- Laboratorijska velikost.
- Omejeni problemi in obratovalni pogoji.
- viri napak: napake meritev, motnje merilnikov, senzorjev

#### **Numerične simulacije**

- Vse veličine.
- Visoka resolucija v prostoru in času.
- Naravna velikost.
- Katerikoli problem in realistični obratovalni pogoji.
- viri napak: modeliranje, diskretizacija, iteracije, zmogljivost HW&SW

Faze CFD simulacije so PpP:

**Pp** - *Pred-procesiranje – opis problema: geometrija, enačbe, robni pogoji in kreiranje mreže celic.*

**p** - *Procesiranje – reševanje sistema enačb.*

**pP** - *Po-procesiranje – analiza rezultatov (izračun sil, pretoka, ..) in vizualizacija (grafi in slike).*

V CFD prevladujejo prenosne enačbe, ki vključujejo ohranitvene fizikalne zakone:

- Ohranitev mase (sprememba mase = 0).
- Ohranitev gibalne količine (sprememba gibalne količine = sila x čas).
- Ohranitev energije (sprememba energije = delo + toplota).

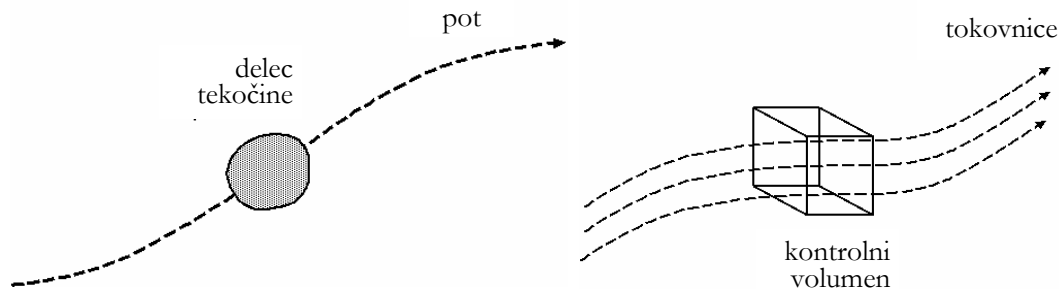
**spremembe energije sistema = razliki dovedene ali oddane toplote in dovedenega ali oddanega dela**

Energija je vsota kinetične, potencialne, notranje in drugih oblik energije.

- Tekočino obravnavamo kot kontinuum.
- Enačbe so izražene s pretoki (masnimi in volumskimi).
- Matematično jih definiramo:
  - *Diferencialnimi enačbami:* Opisujejo spremembo vseh fizikalnih lastnosti v **vsaki točki** v prostoru. Lahko pa volumne izpeljemo v neskončno majhne (vsaj matematično).
  - *Integralskimi enačbami:* Opisujejo spremembo vseh fizikalnih lastnosti v **določenem kontrolnem volumnu** in v določenem časovnem intervalu.

Tok tekočine lahko opisujemo na dva načina:

- **Lagrange** opis gibanja tekočine: Polje toka tekočine sestavlja veliko število delcev tekočine končne velikosti, ki imajo maso, gibalno količino, notranjo energijo in druge fizikalne lastnosti. Matematične enačbe lahko zapišemo za vsak delec tekočine.
- **Euler** opis gibanja tekočine: Popisuje kako se spreminjajo lastnosti toka za en kontrolni volumen, ki je fiksiran v prostoru in času (x, y, z, t).



Slika 32: Lagrange in Euler opis gibanja tekočine

Vir: prirejeno po Bakker: Applied Computational Fluid Dynamics.

Prenosne enačbe lahko zapišemo v obeh metodah opisa gibanja tekočine in tudi konvertiramo med seboj. Enačbe izražamo s pretoki (masnimi, volumskimi) in jih matematično popišemo z diferencialnimi enačbami (strog zapis) ali integralskimi enačbami (šibek zapis – ki ga lahko rešujemo numerično).

### SPREMEMBA = (vhodna količina – izhodna količina) + proizvedena količina

Dobljeni sistem enačb ima sedem neznank: tlak, tri komponente hitrosti, entalpijo, temperaturo in gostoto. Med enačbami je precej skupnih točk. Z uporabo splošne spremenljivke  $\Phi$  lahko splošno obliko enačbe toka tekočine zapišemo v naslednji diferencialni

$$\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\Phi u) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\Phi) + S_\Phi$$

sprememba v $\Phi$ kontrolnem volumnu	+	sprememba $\Phi$ zaradi konvekcije	=	sprememba zaradi $\Phi$ difuzije	+	sprememba $\Phi$ zaradi virov
---	---	--	---	----------------------------------	---	----------------------------------

in integralski obliki:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \int_{CV} \rho\Phi dV \right) + \int_A n(\rho\Phi u) dA = \int_A n(\Gamma \text{grad}\Phi) dA + \int_{CV} S_\Phi dV$$

Najpogosteje uporabljena numerična metoda za predikcijo tokov je *Metoda končnih volumnov*, saj rigorozno izvajajo ohranitvene zakone, geometrijsko fleksibilnost in popisovanje fenomenov tekočin ter direktno relacijo fizikalnih veličin kot je masni pretok. Sicer pa obstaja več metod CFD. Najbolj pogoste in komercialno uspešne metode CFD:

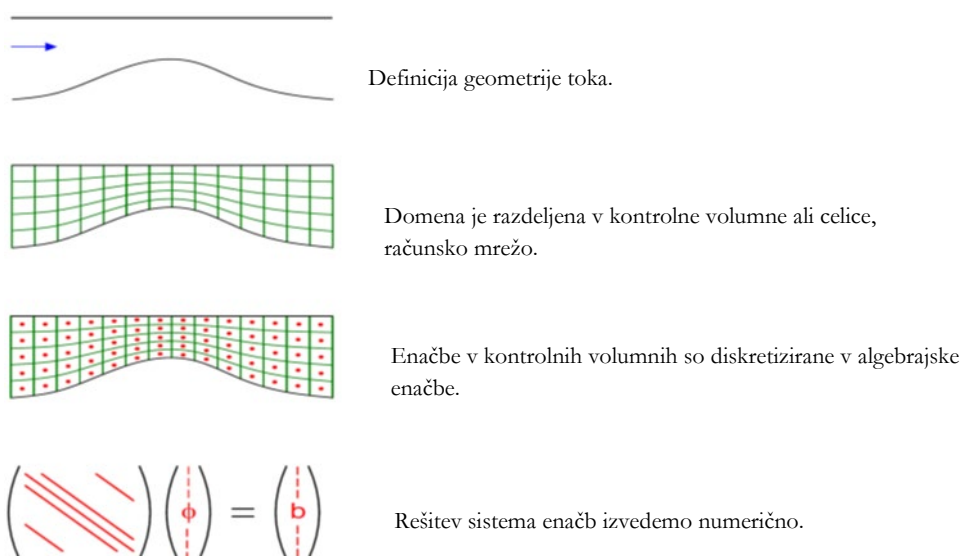
85% - Metoda končnih volumnov

15% - Metoda končnih elementov

5% - (Metoda končnih razlik, Spektralne metode, Metoda robnih elementov, Vrtinčne metode, Lattice-Boltzmann – *meshfree*, ...)

Metoda končnih volumnov razdeli domeno na končno število majhnih kontrolnih volumnov (celic) v mrežo volumnov. Mrežo določajo meje kontrolnih volumnov, računsko vozlišče je v središču kontrolnega volumna, kar ohrani vrednost integrala v kontrolnem volumnu. Skupni tok skozi mejo kontrolnega volumna je vsota integralov po vseh ploskvah kontrolnega volumna (štirih v 2D in šestih v 3D). Kontrolni volumni se ne prekrivajo. Kontrolnim volumnom so predpisane materialne lastnosti in izvori ali ponori.

Osnova sistema so Navier-Stokesove enačbe in enačbe kontinuitete. Za rešitev teh enačb potrebujemo začetne in robne pogoje, ki so obvezna komponenta matematičnega modela, saj robni pogoji neposredno določajo gibanje toka. Vodilne enačbe za numerično računanje iz diferencialne enačbe pretvorimo parcialne diferencialne enačbe, te v integralske, integralske pa v sistem algebrajskih enačb. Vrednosti integrala izračunamo v središču kontrolnega volumna na mejne ploskve pa rezultate interpoliramo. Prvi in drugi odvod sta aproksimirana s členi Taylor vrste. Sistem linearnih algebrajskih enačb se rešuje iterativno.



Slika 36: Primer diskretizacije računske domene

Vir: Prirejeno po Bakker: Applied Computational Fluid Dynamics.

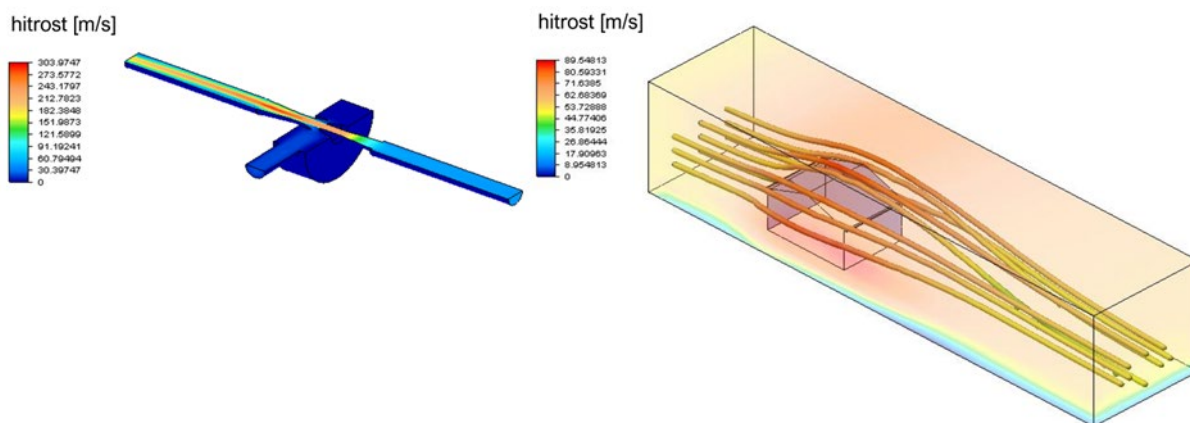
## Pp – pred-procesiranje

Pred-procesiranje zajema modeliranje geometrije, generiranje mreže, definicijo enačb in definicijo robnih pogojev. Modeliranje je formulacija matematično fizikalnega problema z IBVP – *initial boundary value problem* z numeričnim reševanjem PDE z robnimi in začetnimi pogoji.

- Simulacija se prične z matematičnim modelom fizikalnega problema.
- Ohranitev snovi, momenta in energije mora biti zagotovljena v celotni domeni.
- Lastnosti tekočin so določene empirično.
- Aproksimacije in poenostavitve uporabljamo za lažje doseganje rezultatov.
- Pravilni začetni in robni pogoji problema so izredno pomembni.

## Modeliranje geometrije

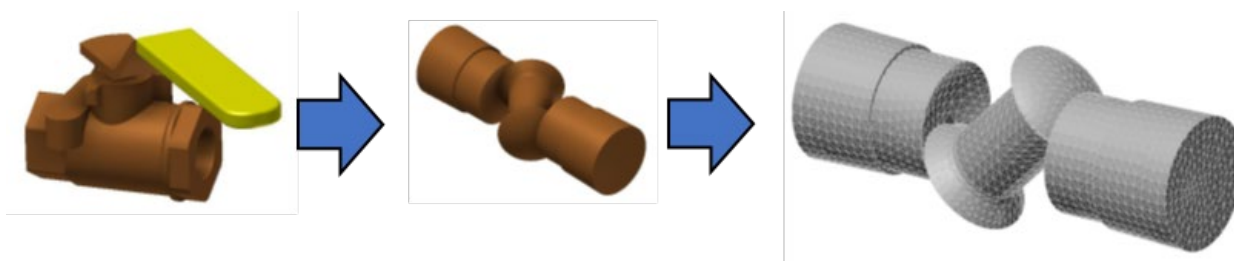
Simulacije tekočin v osnovi delimo na notranje (internal) in zunanje (external) saj ta delitev pomeni velikost in lastnosti računske domene. Na sliki 34 je prikaz notranje (tok vode v cevi) in zunanje (tok zraka okrog hiše) simulacije.



**Slika 34: Primer notranje in zunanje simulacije.**

Vir: prirejeno po Bakker: Applied Computational Fluid Dynamics.

CFD model, oziroma domeno pridobimo večinoma iz CAD sistemov (direktno ali preko standardnih nevtralnih formatov IGES, STEP,...). Primer definicije domene, direktno iz CAD sistema, notranjega toka v krogljčnem ventilu je na sliki 35.



**Slika 35: Primer prenosa domene iz CAD v CFD z mreženjem računske domene.**

Vir: SolidWorks Instructor's Guide.

## Definiranje tokovnih pogojev

Pri definiciji simulacije je potrebno definirati tokovne pogoje:

- Viskozni ali ne-viskozni fluidi (Re).
- Zunanji ali notranji tok (stena – wall).
- Laminaren ali turbulenten tok (Re) izbrati turbulentni model.
- Stisljiv ali nestisljiv fluid (Mach) enačbe stanja.
- Eno-fazni ali več-fazni tok (kavitacija, voda - para) kavitacijski model.
- Toplotni efekti, gostota (Prandtl, g, Grashoh,...) ohranitev energije.
- Kemijske reakcije, zgorevanje (Pe, Da)...

## Definiranje robnih pogojev

Pri reševanju Navier-Stokesove enačb in enačbe kontinuitete je potrebno definirati ustrezne začetne in robne pogoje.

- Robni pogoji so obvezna komponenta matematičnega modela.
- Robni pogoji neposredno določajo gibanje toka.
- Določitev tokov v računsko domeno: masa, gibalna količina in energija.
- Področja tekočine in sten so določena s področji, conami.
- Celicam so predpisane materialne lastnosti in izvori.
- Pri uporabi Dirichlet robnega pogoja predpišemo vrednost spremenljivke na robu;  $u(x)=\text{konstanta}$ .
- Pri uporabi Neumannovega robnega pogoja predpišemo gradient pravokotno (normala) na rob  $\partial n u(x) = \text{konstanta}$ .
- Pri uporabi mešanega robnega pogoja se uporabi funkcija oblike:  $au(x)+b\partial n u(x)=\text{konstanta}$ .
- Na določenem robu lahko za različne spremenljivke uporabljamo različne vrste robnih pogojev.

Širok nabor tipov robnih pogojev omogoča definicijo vstopa in izstopa toka v domeno (INLET in OUTLET):

- Splošno: tlak na vstopu, tlak na izstopu.
- Nestisljivi tok: hitrost na vstopu in izstopu.
- Stisljivi tokovi: masni pretok na vstopu, tlak po domeni.

Robni pogoji so odvisni od izbranega fizikalnega modela. Splošne smernice:

- Izberite lokacijo in obliko roba kjer predpisujete pogoje tako, da gre tok pravokotno v celico ali iz nje. Ni obvezno, vendar običajno pomeni boljšo konvergenco.
- Veliki gradienti v normalni smeri na vhodni ali izhodni rob kažejo na napačno specifikacijo problema.

## Definiranje celic mreže – mreženje

Mreženje domene s celicami je izredno pomembno za popisovanje fizikalnega modela. V večini primerov domeno razdelimo na cone in mrežimo vsako cono posebej.

- Mreža celic:
  - Označuje celice ali elemente v katerih rešujemo tok tekočine.
  - Je diskretna predstavitev geometrije domene.
  - Ima celice, združene v mejna področja, kjer definiramo robne pogoje.
- Mreža pomembno vpliva na:
  - Hitrost in stopnjo konvergence.
  - Natančnost rešitve.
  - Potreben čas računanja.
- Pomen kakovosti mreže za dobro rešitev:
  - Gostota mreže.
  - Razmerje med dolžino in prostornino sosednjih celic.
  - Deformiranost oziroma popačenje celic, čim manjša popačenost mreže blizu roba s steno.
  - Mreža mejne plasti ob stenah.

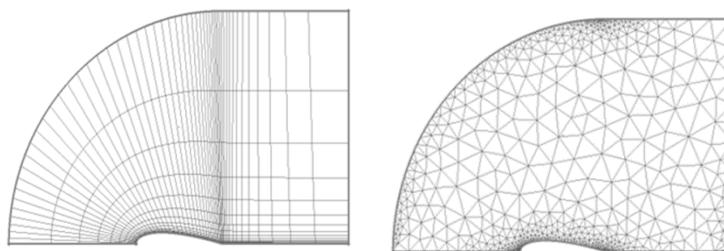
Mreženje je podobno kot pri mreženju metode končnih elementov. Poznamo urejeno in prosto in hibridno mreženje. Na sliki 37 so prikazani vsi trije tipi mrež z izrazitim zgoščevanjem mrež ob steni.

## Mreže in mejna plast

Posebej pazimo na mejno plast (vplivno plast med steno in tekočino)  $y^+$ ; zelo gosta mreža štirikotnih elementov. Za kompleksno geometrijo uporabimo prosto mrežo in omogočimo tudi adaptivno zgoščevanje. Večinoma kombiniramo urejeno mrežo v mejnih



plasteh in prosto mrežo v ostali domeni, s tem so natančneje zajete fizikalne lastnosti okoli sten modela in popis turbulence.



Slika 36: Primer urejene in proste mreže v okoli lopatice vetrne turbine (zelo gosta mreža v mejnem področju).

Mreženje praktični nasveti:

- Mreža mora slediti fizikalnim lastnostim toka.
- Gostejša mreža daje boljše rezultate in povečuje čas računanja.
- Pri enakem številu elementov dajejo pravokotni, prizmatični elementi boljše in natančnejše rezultate, sploh če so elementi poravnani s tokom.
- Mreža mora biti dovolj gosta, da lahko opiše in zajame vse pomembne značilnosti toka.
- Mreža ob steni mora biti dovolj fina, da razreši tok mejne plasti. V mejnih plasteh uporabimo prizmatične elemente.
- Pri kompleksni geometriji nimajo pravokotni elementi nobene numerične prednosti, popisovanja geometrije je bolje s trikotnimi.
- Učinkovitost in natančnost sta odvisna od področja uporabe – v vsakem področju dosega svojo natančnost.

### Turbulentni modeli

Fizikalno modeliranje je mogoče izvesti le z razumevanjem fizikalnih pojavov, ki prevladujejo pri določenih pogojih. Kadar je v toku prisotna turbulenca, se zdi, da prevladuje nad vsemi drugimi pojavi toka. Uspešno modeliranje turbulentnega toka močno poveča kakovost numeričnih simulacij.

Način kreiranja geometrije in generiranje mreže, izračun in način predstavitve pridobljenih rezultatov je znan. Na voljo imamo natančne teoretske podlage in kakovostno računalniško grafiko. Na žalost to ne drži za postavitev fizikalnega modela turbulentnih tokov. Osnovna težava je v tem, da skušamo zelo zapletene pojave modelirati s čim

preprostejšim modelom. Idealen model bi moral v enačbe vnesti minimalno mero kompleksnosti in hkrati zajeti bistvo fizikalnih lastnosti.

Kaj je turbulenca?

- Časovno, nepravilno ne-periodično gibanje, kjer prenosne količine (masa, gibalna količina) variirajo v času in prostoru. (vrtinci in mešanje snovi, gibalne količine, energije, ...)
- Naključno spreminjanje lastnosti tekočine in toka (predvsem hitrosti). Prenosni mehanizmi so izvedeni s statističnim povprečenjem, kar omogoča modeliranje turbulence.
- Turbulenca vsebuje široko paleto velikosti vrtinčastih tvorb. Velikost vrtincev je značilnost toka – veliki vrtinci dobivajo energijo iz toka. Energija se prenaša od velikih na male vrtince – v manjših vrtincih se turbulentna energija pretvarja v notranjo preko viskoznosti. Pojav imenujemo energijska kaskada.

Turbulentnost toka ugotavljamo z izračunom Reynolds števila ( $Re$ ), ki je odvisno od referenčne dolžine, hitrosti in gostote in viskoznosti tekočine. Za simulacijo turbulentnih tokov uporabljamo turbulentne modele.

Kompleksnost različnih turbulentnih modelov se močno razlikuje, odvisno od podrobnosti, ki jih želimo opazovati z izvajanjem numeričnih simulacij. Kompleksnost je posledica Navier-Stokesove enačbe, ki je nelinearna, časovno odvisna in tridimenzionalna parcialna diferencialna enačba.

Turbulenca je nestabilnost laminarnega toka, ki se pojavi pri visokih  $Re$ . Izvor nestabilnosti tvorijo interakcije (povezave) med nelinearnimi vztrajnostnimi in viskozni členi *Navier-Stokesovih enačb*. Interakcije so rotacijske, popolnoma 3D, odvisne od časa in večinoma povezane z vrtinčenjem in transformacijami v samem toku. Dejansko reševanje vrtinčnega toka v 2D ni možno, zato ni na voljo zadovoljivih 2D aproksimacij za turbulentne pojave. Ker turbulenca velja za naključen proces v času, ni mogoč noben deterministični pristop.

Lastnosti turbulence poskušamo določiti s statističnimi metodami, ki uvajajo korelacijske funkcije med spremenljivkami pretoka. Vendar teh povezav ni mogoče določiti vnaprej. Druga pomembna značilnost turbulentnega toka je, da se vrtinčne strukture premikajo vzdolž toka. Njihova življenjska doba je običajno zelo dolga, zato nekaterih turbulentnih količin ni mogoče določiti kot lokalne. To pomeni, da je zelo pomembna tudi zgodovina

toka. V prenosnih enačbah ni enačb, ki bi posebej obravnavale le turbulenco. Za izračune turbulentnih tokov uporabljamo različne modele, najbolj znani:

– **DNS** (*Direct Numerical Simulations*)

Teoretično lahko simulira vse tokove (laminarne-turbulentne) z numeričnim reševanjem Navier-Stokesovih enačb. Rešuje cel spekter vrtincev brez modeliranja. Rešuje tudi najmanjše vrtince v toku (gostota celic). Cena je previsoka! Praktično se ne uporablja – pregosta mreža celic. Uporabljamo ga za laminarne tokove in redko za turbulentne.

– **LES** (*Large Eddy Simulation*)

Izračuna časovno spremenljiv tok s prostorskim povprečenjem. Računa velike vrtince, vrtince manjše od mreže pa modelira. Metoda je nestabilna pri kompleksni geometriji. Dobra je pri cepljenju tokov, a slaba v mejni plasti. Cenejša kot DNS, računska moč še vedno prevelika za praktične aplikacije.

– **RANS** (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*)

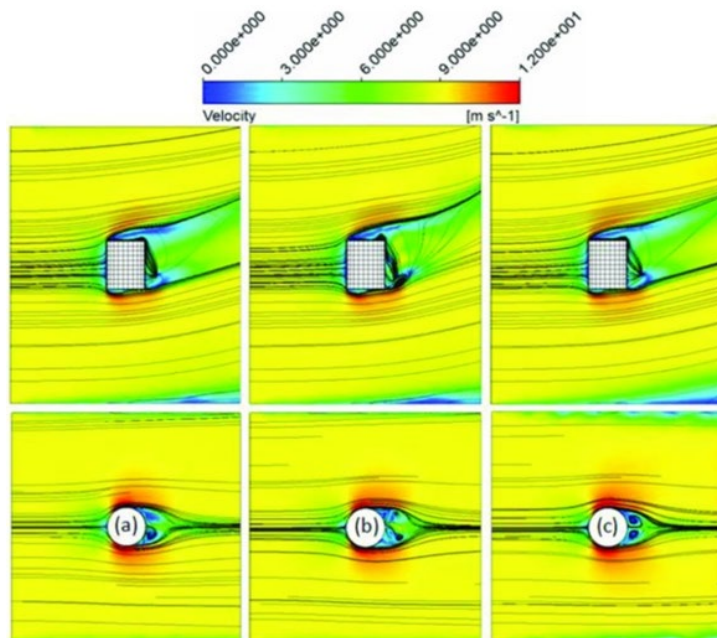
Rešuje časovno povprečene Navier-Stokes enačbe. Modeliranje vseh velikosti vrtincev (več različnih pod modelov). Ta metoda je najpogosteje uporabljeno modeliranje turbulence. Reynolds napetosti so modelirane s turbulentno viskoznostjo  $\mu_T$ ; deluje za enostavne turbulentne tokove (strig): robne plasti, mešanje, tok v kanalu.

$$R_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_T \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu_T \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} \delta_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}$$

Znotraj te metode je veliko verzij modelov viskoznega toka:

- *Zero Equation model.*
- *Standard  $k$ - $\varepsilon$  model.*
- *RNG  $k$ - $\varepsilon$  model.*
- *Standard  $k$ - $\omega$  model.*
- *SST zonal  $k$ - $\omega$  based model.*

Splošno modeli DNS in LES, ko izračunavajo nihajne količine, rešujejo krajše dolžine kot modeli, ki uporabljajo enačbe RANS, zato zagotavljajo boljše rezultate. Potrebujejo pa bistveno večjo računsko moč kot modeli, ki uporabljajo metode RANS.



Slika 37: Primeri uporabe različnih turbulentnih modelov zraka 9m/s okrog ovire: (a) RANS; (b) k- $\omega$ ; (c) k-SST

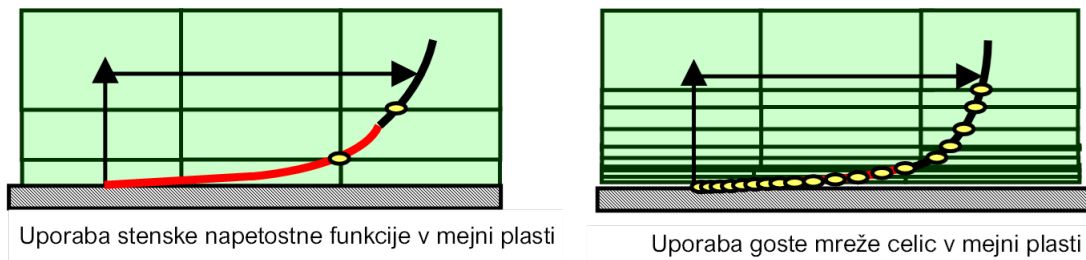
Vir: Ansys Instructor's Guide.

*Ne obstaja en praktični univerzalni turbulentni model, ki bi izvedel dobro in natančno predikcijo turbulentnega toka.*

Turbulenca ob steni – hitrostni profil ob steni je zelo pomemben za:

- *Pressure Drop* – padec tlaka.
- *Separation* – cepitev toka.
- *Shear Effects* – učinki striga.

Turbulentni modeli so večinoma bolj primerni za simulacije toka izven mejnih (robnih) plasti s steno *boundary layer*. Podatki o profilu hitrosti v merilu v bližini stene dobijo predvidljivo obliko (prehod iz linearnega v logaritmično obnašanje). Ker so razmere v bližini stene predvidljive, lahko določimo profile ob steni s funkcijami namesto, da uporabimo gosto mrežo za dejansko računanje profila. Funkcije se imenujejo stenske funkcije (*wall functions*).



Slika 38: Turbulenca ob steni – če uporabljamo napetostno funkcijo potrebujemo manj gosto mrežo celic.  
Vir: Ansys Instructor's Guide.

Razdalja  $y^+$  je normirana oddaljenost od stene; razdalja prvega vozlišča od stene; stenske funkcije so veljavne samo znotraj določenih vrednosti  $y^+$

- $y^+$  je previsoko; prvo vozlišče je zunaj mejne plasti in stenske funkcije bodo vključene predaleč v domeni.
- $y^+$  je prenizko; prvo vozlišče je v laminarnem (viskozem) delu mejne plasti, kjer stenske funkcije ne dajejo pravih rezultatov.

Kadar pride ob steni do cepljenja tokov, stenske funkcije ne dajo pravih rezultatov (profila v mejni plasti). V takšnih primerih ne uporabljamo stenskih funkcij ampak direktno reševanje v mejni plasti.

Določitev  $y^+$ : naslednja formula temelji na toku čez ravno ploščo:

$$\Delta y = L y^+ \sqrt{74} \text{Re}_L^{-13/14}$$

- $\Delta y$  razdalja med steno in prvim vozliščem,
- $L$  merilo dolžine toka,
- $y^+$  željena vrednost  $y^+$ ,
- $\text{Re}_L$  Reynolds število na podlagi dolžinskega merila  $L$ .

Standardni RANS turbulentni modeli v CFD:

### Standardni k- $\epsilon$ model

- Standardni "industrijski" CFD, ponuja dober kompromis med potrebno računsko močjo in natančnostjo.
- Vedno uporablja stenske funkcije.

- $y^+$  je običajno  $< 300$ , da so stenske funkcije veljavne.
- Znanе slabosti:
  - cepljenje toka je slabo rešeno (predvideno) zaradi uporabe stenskih funkcij.
  - nenatančnost pri vrtinčastih tokovih in tokovih z močno ukrivljenostjo tokovnice.

### Standardni $k-\omega$ model

- Ena od prednosti modela je predikcija toka ob steni pri nizkem Reynolds številu; mreža ob steni je dovolj fina, da reši laminarni (viskozni) del mejne plasti, ki je zelo blizu stene.
- Model  $k-\omega$  z nizkim Reynoldsovим številom zahteva samo  $y^+ \leq 2$ ; Če bi bil na voljo model  $k-\epsilon$  z nizko vrednostjo  $Re$ , bi bil potreben precej majhen  $y^+$
- niti  $y^+ \leq 2$  v večini primerov ni zagotovilo v industrijski rabi

### Shear Stress Transport (SST) model

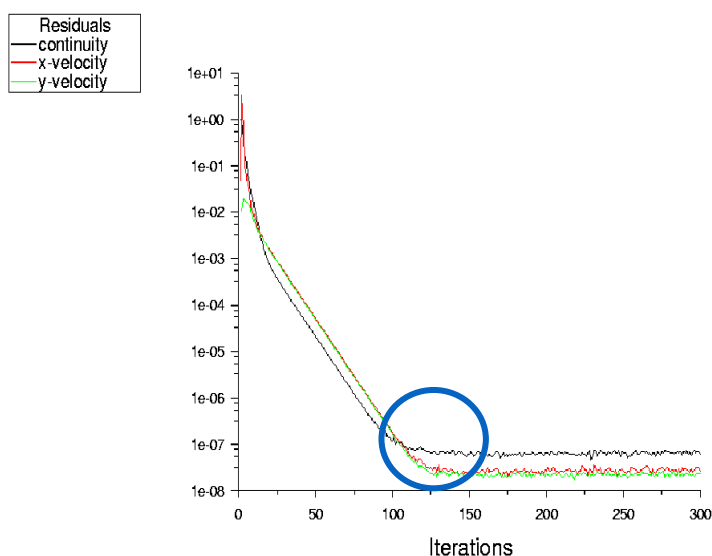
- SST model temelji na modelu  $k-\omega$  in ima enako predikcijo ob stenah.
- Upošteva prenos turbulentne strižne napetosti in daje zelo natančne napovedi začetka in obsega cepljenja toka.
- *V veliki večini primerov je ta model prva izbira; na podlagi rezultatov tega modela se lahko odločimo za uporabo katerega drugega modela.*

Uspešno modeliranje turbulence zahteva dobro presojo:

- Fizikalne lastnosti toka.
- Razpoložljiva računalniška moč.
- Zahtevana natančnost.
- Izvajanje modeliranja ob steni.
- Postopek modeliranja:
  - Izračunajte karakteristiko  $Re$  in ugotovite, ali je tok turbulenten.
  - Preden ustvarjate mrežo, ocenite vrednost  $y^+$
  - Model SST je dobra izbira za večino tokov.

## p – procesiranje

- Sistem algebraičnih enačb je rešen numerično za spremenljivke mehanike tekočin v vsaki celici.
- Čas računanja je odvisen od dobre definicije problema, konvergence in zmogljivosti računalnika.
- Ne-stacionarne simulacije terjajo veliko računalniško moč; paralelne CPU, RAM, GPU.
- Sproti preverjamo konvergenco in spremembe spremenljivk med iteracijami.
- Numerične napake (iteracije, ekstrapolacije, ...)
- Modelske napake (izbira numeričnega (turbulentnega) modela, večfazne tekočine, poenostavitve, ...)



Slika 39: Rešitev dobro konvergira; nadaljnje iteracije ne bodo spremenile ali izboljšale rezultatov.  
Vir: Ansys Instructor's Guide.

## pP – po-procesiranje

### Rezultati simulacij in njih analiza

Rezultati CFD niso nikoli popolnoma zanesljivi:

- vhodni podatki so velikokrat nenatančni (ocenjevanje, ugibanje),
- izbrani matematični model ni pravilen,
- natančnost je odvisna tudi od strojne in programske opreme.

Rezultate tvorijo:

- Komponente hitrosti (x,y,z) po celotni domeni.
- Tlak v vsakem vozlišču.
- Reakcijske sile v tekočini.
- Volumski ali masni pretok.
- *Particle paths* – pomikanje elementov po domeni.
- *Streamlines* – tok med vozlišči.

Rezultate spremljamo v grafični ali numerični obliki.

- Grafično:
  - Risanje vektorjev.
  - Risanje kontur.
  - Izo-linije.
  - Tokovnice.
  - Animacije.
- Alfanumerično:
  - Vrednost integralov.
  - Računanje upora, vzgona, momenta, ..
  - Povprečja, maksimumi, minimumi.
  - Primerjava z eksperimentalnimi podatki.

Tlak in hitrost tekočine se vedno računata skupaj. Tlak lahko uporabimo za izračun sil na predmete, na primer za napoved koeficienta upora avtomobila. Hitrosti tekočine je mogoče vizualizirati s tem prikažemo obliko toka.

Iz tlaka izračunamo sile (upor, vzgon, moment) z integracijo tlaka po površini objekta. Celotni tlak je stavljen iz statičnega in dinamičnega tlaka. Tlak sestavljajo 3 komponente:

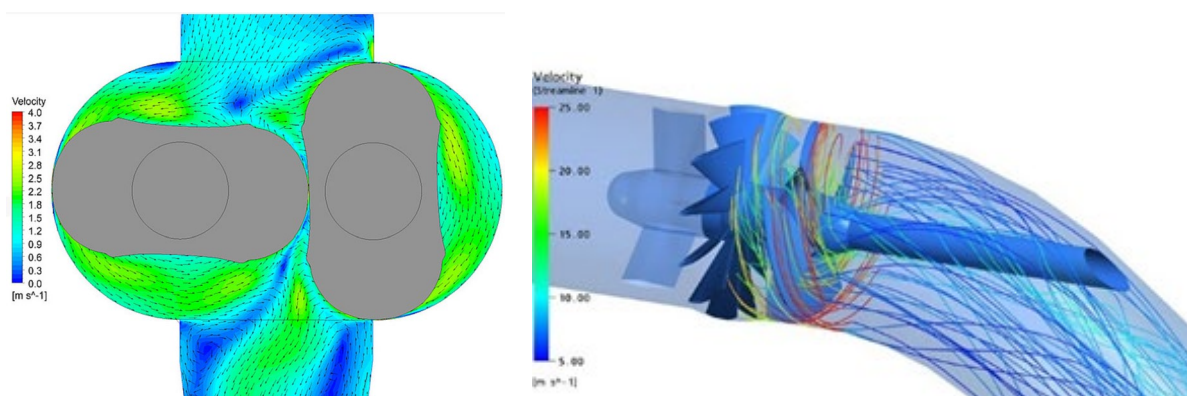
Hidrostatični tlak ( $\rho gh$ ); Dinamični tlak ( $\rho v^2/2$ ),

Statični tlak  $p_s$ . atmosferski tlak + tlačna razlika (ko govorimo o statičnem tlaku, večinoma govorimo le o tlačni razliki).



Prikaz in vizualizacija rezultatov CFD:

- *Velocity vectors* – so komponente hitrosti vizualizirane z risanjem vektorjev.
- *Streamlines* so krivulje, ki so posod tangencialne na hitrostni vektor in so trajektorije toka.
- *Pathlines* – je trajektorija posameznega delca tekočine, odvisen je od lokacije, težko eksperimentalno dokazati (za prikaz uporaba kroglic ali trakov).
- *Streaklines* – krivulja, ki se formira, če v tekočino konstantno injiciramo delce ali barvo; eksperimentalna uporaba; pri stacionarnem toku so *streaklines* in *pathlines* enake.
- *Timelines* je linija toka, ki nastane, ko postavimo markerje vzdolž krivulje v nekem času in preverimo obliko krivulje z markerji v poznejšem času. Včasih jih imenujemo tudi materialne linije. Tako kot *streaklines* vključujejo hkratne položaje številnih delcev, vendar za razliko od črt delci *timelines* ne izhajajo iz ene same točke, ampak so na začetku razporejeni vzdolž krivulje. Sorazmerno enostavno jih je izvesti eksperimentalno, tako da črte barvil postavimo v polje toka v času. Pri študijah mešanja tekočin se deformacija materialnih linij preučuje zelo podrobno.
- *Oilflowlines* so *pathlines*, ki so omejene na površino. Primer bi bile črte, ki jih zarišejo kapljice vode na vetrobranskem steklu avtomobila.



Slika 40: Najbolj pogosti primeri prikaza rezultatov: hitrostni vektorji v črpalki, in tokovnice v turbini

Vir: Turbina Numerische Strömungssimulation in einem Wasserkraftwerk, HFM, TU Graz;

Napredek na področju simulacij CFD je močno odvisen od razvoja računalniških tehnologij in od našega razumevanja in možnosti numeričnega reševanja navadnih in parcialnih diferencialnih enačb. Vendar je CFD veliko več kot računalništvo in numerika. Ker neposredno numerično reševanje kompleksnih tokov v resničnih razmerah zahteva ogromno računske moči, je uspeh pri reševanju problemov zelo odvisen od uporabljenih fizikalnih modelov. Fizikalno modeliranje je mogoče izvesti le z razumevanjem fizikalnih pojavov, ki prevladujejo pri določenih pogojih.

## **Prednosti uporabe metod CFD:**

### **Relativno poceni**

Uporaba eksperimentov in testiranj za pridobivanje inženirskih podatkov je draga. CFD simulacije so relativno poceni, stroški padajo s ceno in močjo HW.

### **Hitrost**

CFD simulacije lahko izvedemo v relativno kratkem času. Rezultate lahko vključimo v CAx.

### **Možnost simulirati realne pogoje.**

Veliko rezultatov ni mogoče (enostavno) testirati, na primer hipersonični tok. CFD teoretično omogoča simulacijo katerihkoli fizikalnih pogojev.

### **Omogoča simulacijo idealnih pogojev**

CFD omogoča dobro kontrolo nad celotnim fizikalnim procesom in omogoča izolacijo in raziskovanje posameznih fizikalnih fenomenov. Prenos toplote lahko idealiziramo na adiabatni steni, steni s konstantnim dotokom toplote ali steni s konstantno temperaturo.

### **Dodatne informacije**

Eksperimenti dovoljujejo pridobivanje podatkov samo na omejenem številu lokacij (npr. tlačne in temperaturne sonde, merilniki pretoka, ...). CFD omogoča uporabniku, da preuči veliko število lokacij v področju, ki ga zanima, in uporabi veliko veličin za vpogled in vrednotenje.

## **Omejitve uporabe metod CFD:**

### **Fizikalni modeli**

CFD rešitve temeljijo na fizikalnih modelih realnega sveta (turbulenca, stisljivost, večfazni tok,...). CFD rešitve so lahko natančne kot so fizikalni modeli na katerih temeljijo.

## Numerične napake

Numerično reševanje vedno doda numerične napake. Zaokrožitvene napake: omejenost prostora v računalniku vedno obstajajo; pri enostavnih primerih so majhne. Napake zaradi aproksimacij: z velikostjo mreže (zmanjšanjem elementov) gredo proti nič.

## Robni pogoji

Kot velja za fizikalne modele, natančnost rešitev je neposredno odvisna od kakovosti definicije začetnih in robnih pogojev (tok v kanalu z razširitvijo; če tok prihaja po cevi je potrebno vzeti popolnoma razvit hitrostni profil, ne pa predpostaviti enakomerne hitrosti toka).

### 3.6.3 Simulacije gibanja

Večina izdelkov je sestavljenih in znotraj sestava imamo gibajoče se dele. Simulacija gibanja je kreiranje simulacij glede na pozicijo, hitrost, pospešek in moment kot funkcije časa z zunanjimi obremenitvami na togih telesih, **mehanizmi**.

Simulacije gibanja nam omogočajo:

- Raziskovanje izdelkov v zgodnji fazi nastajanja.
- Verifikacija rešitev.
- Zmanjšuje število fizičnih prototipov.
- Izboljšanje in optimiranje delovanja.
- Izkazujejo potrebo po dodatnih analizah posameznih komponent.
- Verifikacijo časa izvedbe enega cikla operacije?
- Kakšna moč motorja je potrebna?
- Koliko sile je potrebno?
- Kakšna je obremenitev na posamezno komponento?

Tipi simulacij gibanja:

- Kinematics-Kinematika – opisuje gibanje objektov brez obremenitev.
- Dynamic Simulation-Dinamične simulacije – upoštevanje mas in notranjih sil na mehanizem.

- Rigid body dynamics- Dinamika togih teles – objekti imajo geometrijske značilnosti (težišče, vztrajnostni momenti), ki definirajo gibanje v 6 prostostnih stopnjah.

Koraki simulacije so:

#### 1. Priprava:

- Združevanje komponent, ki med seboj nimajo relativnega gibanja
- Delitev na sklope in podsklope;
- fiksiranje ne-gibajočih komponent (vijaki, ...);
- vse komponente imajo predpisane materialne lastnosti.

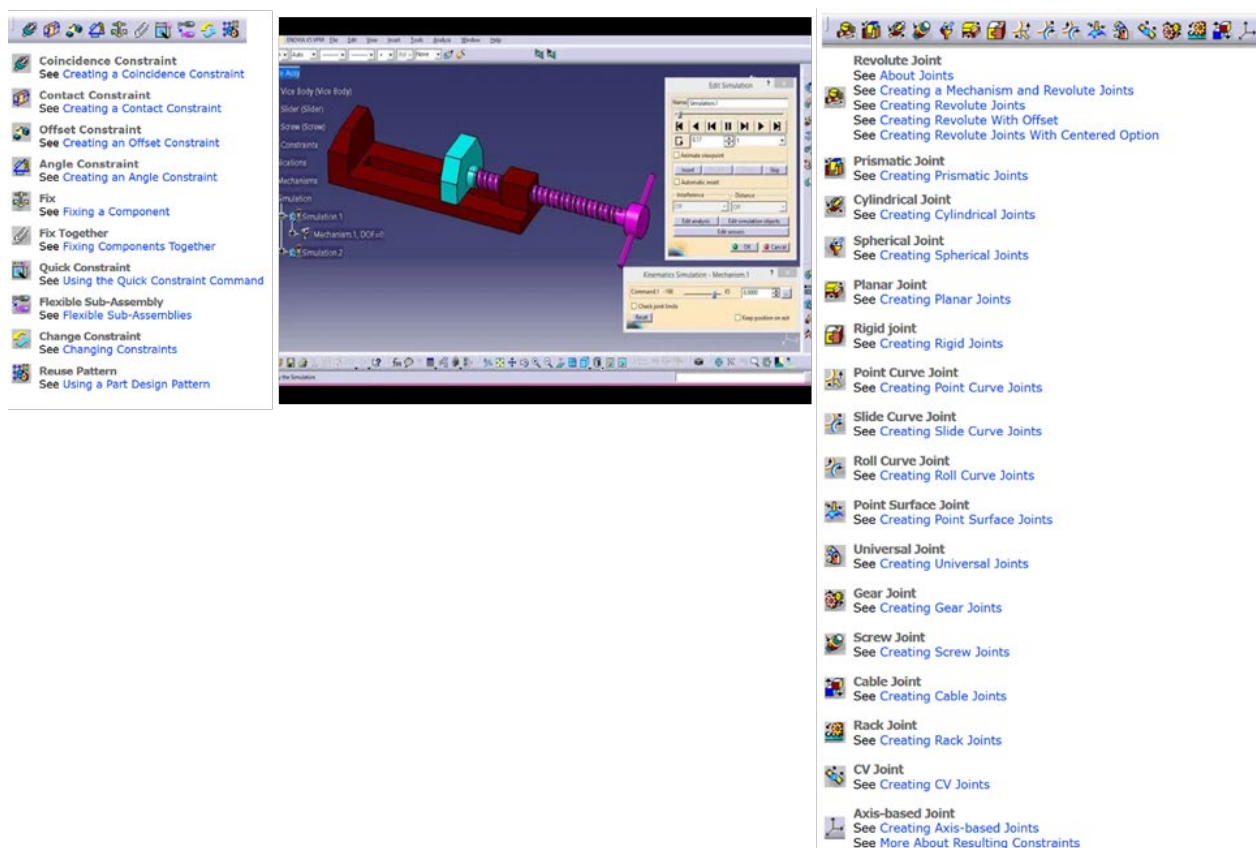
#### 2. Definiranje sklepov – JOINT

- je povezava med dvema togima komponentama;
- prenaša silo iz ene komponente na drugo;
- uporabimo lokalni koordinatni sistem za definicijo smeri gibanja.
- Kreiranje sklepov
- Najpomembnejši element pri simulaciji gibanja;
- sklopi definirajo prostostne stopnje in lastnosti (trenje, dušenje);
- velikokrat so podobni definicijam omejitvam pri sestavljanju sklopov, vendar je med njimi bistvena razlika: omejitve upoštevajo geometrijo, sklepi pa tudi hitrosti, pospeške in obremenitve.
- večinoma imamo že pripravljene sklope, ki jih je potrebno umestiti (jermenski, zobniški, kontaktni) ;
- definicija lastnosti vzame veliko časa;
- s povezovanjem nastajajo kinematične verige; lahko so odprte ali zaprte, imajo vsaj en fiksiran člen in  $n$  kinematičnih členov.

#### 3. Dodajanje zunanjih sil, gibal, motorjev, ki povzročajo gibanje; lahko so konstantni, ciklični, ....

#### 4. Simulacija in analiza rezultatov.

- Zunanje sile zagotavljajo in vodijo gibanje v simulaciji (gravitacija, sila, moment).
- Ko je simulacija zaključena lahko analiziramo rezultate (reakcije, hitrosti, pospeški, momenti, pomiki).



Slika 41: Primeri relacij za sestavljanje sklopov in možnosti definicije sklepov na primeru v CATIA.

### 3.7 Virtualna proizvodnja

Izraz virtualna proizvodnja (*VM-virtual manufacturing*) se pogosto uporablja v literaturi z nekaj različnimi definicijami, ki označujejo VM na naslednji način: "Proizvajati virtualne izdelke, opredeljene kot skupek računalniških informacij, ki zagotavljajo predstavitev lastnosti in vedenja aktualiziranega izdelka". Ključne besede, ki se povezujejo z VM so "proizvodnja v računalniku". Tako kot uporaba tehnologij CAD/CAM omogoča skrajšanje časa pri načrtovanju izdelka, ima VM podobne učinke pri načrtovanju tehnologije in proizvodnih procesov za njegovo proizvodnjo, z njihovim modeliranjem, simulacijo in optimizacijo. Virtualna proizvodnja, ki jo pogosto označujejo kot "naslednjo revolucijo v globalni proizvodnji", predvideva tudi nelinearno FEM (metoda končnih elementov) ali FVM (metoda končnega volumna) analizo in simulacijo vseh procesov v proizvodni tehnologiji določenega izdelka. Tehnološka simulacija omogoča podjetjem optimizacijo ključnih dejavnikov, ki neposredno vplivajo na donosnost izdelka, kot so: preoblikovalnost, končna oblika in natančnost, stopnja preostalih napetosti, zanesljivost pri izkoriščanju in podobno. Dobičkonosnost se poveča z znižanjem proizvodnih stroškov, prihrankom materiala, odpravo okvar, zmanjševanjem časa in stroškov razvoja izdelka in oblikovanja orodij z zmanjšanjem števila neuspešnih poskusov. Uporaba

numeričnih simulacij je zelo dobro preverjeno in izjemno uporabno orodje za napovedovanje problemov v industrijski proizvodnji ter skrajševanje časa in stroškov pri razvoju novih izdelkov. Njihova osnovna prednost je možnost izvajanja simulacij »kaj-če«, ki oblikovalcem omogočajo oceno različnih konstrukcijskih alternativ na virtualnih modelih procesov, ki se načrtujejo pri izdelavi izdelka. Ker so modeli virtualnih procesov zelo prilagodljivi, omogočajo raziskovanje vplivov konstrukcijskih sprememb, tako geometrije izdelka kot procesnih parametrov, na kakovost izdelka in stroške izdelave. V takih razmerah je možno razmeroma hitro izvesti analizo občutljivosti v pogojih vzporednega procesiranja in vzpostaviti območja optimizirane konstrukcijske rešitve. Poleg tega je mogoče predvideti okvare in pojav napak na izdelku, optimalno uporabiti proizvodno opremo in orodja, oceniti obrabo in življenjsko dobo orodja ter preprečiti zlome. Optimalna izbira ustreznih proizvodnih parametrov ima pozitivne posledice na skrajšanje časa do trženja, stroškov izdelave, materiala in orodij ter povečanje kakovosti končnega izdelka.

Sodobni računalniško podprti sistemi so izredno zmogljiva orodja, s katerimi lahko simuliramo celoten življenjski cikel izdelka, od koncepta in parametrične zasnove do testiranja, izvedbe montaže, vzdrževanja in celo prodajnih aktivnosti.

Možnosti generiranja NC kode in simulacije gibanja orodja, izbire vrstnega reda postopkov in preverjanja toleranc so posebej pomembne pri izdelavi orodij in polizdelkov na CNC strojih. V sodobnih računalniško podprtih orodjih so na voljo moduli za avtomatsko oblikovanje gravure orodij na podlagi modela izdelka, v procesih brizganja plastike, kovanja, preoblikovanja pločevine in drugih.

### **3.8 Virtualna kontrola kakovosti in verifikacija**

Znano je, da je meroslovje sestavni del proizvodnih procesov in ima z razvojem sistemov za digitalizacijo geometrije in objektov, ki se uporabljajo tudi v obnovljivih tehnologijah, pomembno mesto v zgodnjih fazah snovanja izdelkov in verifikacije projektnih rešitev. Izbira metod in tehnik za nadzor kakovosti izdelkov in preverjanje oblikovalskih rešitev je odvisna od fizičnega merila (mili, mikro, nano), oblike sestavnih delov izdelka (kompleksne, z ali brez notranjih elementov), barv in površinske topografije itd. Metode dimenzijskega preverjanja obsegajo brezkontaktne (magnetne, akustične, optične) in kontaktne metode (robotske in CMM-*Coordinate Measuring Machine*), kjer se največ uporabljajo optične metode in koordinatno meroslovje. Sodobni trendi se obravnavajo pri uporabi sistemov, ki omogočajo nadzor in merjenje na več načinov, to so senzorji, kot je multi-senzorska CMM. Združujejo prednosti optičnih in kontaktnih metod

za pridobitev obilice informacij za dimenzijsko analizo in preverjanje površinske topografije. Možnosti sodobnih meroslovnih sistemov so v največji meri podprte z zmogljivo programsko opremo, ki nadzoruje proces zajema in obdelave merilnih podatkov vse do avtomatske ocene merilne negotovosti. Poleg tega CAD funkcije omogočajo pripravo merilnih programov brez fizičnega modela, na podlagi njegovega virtualnega modela.





## 4 Virtualni razvoj izdelkov

Vse komponente virtualnega inženiringa je potrebno povezati in omogočiti prenose direktne podatkov med komponentami kar je izvedeno z informacijskimi sistemi. Skupno programsko okolje za integrirano obdelovanje omogoča, da različne, tudi dislocirane, skupine, vključene v proces oblikovanja, sodelujejo pri razvoju učinkovitega virtualnega modela izdelka. Takšen pristop odpira nove možnosti in področja trženjske analize, več-kriterijske ocene zasnove izdelka in različic izdelave, optimizacije lastnosti izdelka za zagotavljanje visoke kakovosti, zanesljivosti in izdelovalnosti, enostavne montaže in vzdrževanja. Na ta način se znatno skrajšajo čas in stroški razvoja, življenjska doba izdelka ter izboljša njegova kakovost in izkoriščenost. Vodilni proizvajalci programske opreme industriji kot končnemu uporabniku ponujajo celovite rešitve integriranega virtualnega razvoja izdelkov.

Virtualni inženiring v osnovi bazira na obvladovanju podatkov o izdelkih, ki so zelo heterogeni. Predstavljajo jih besedila na papirju ali digitalni obliki, slike, katalogi, ilustracije, preračuni, rezultati simulacij, analize ...

V osnovi ločimo tri stopnje obvladovanja podatkov o izdelku (*Product data*):

1. digitalni model (*Digital Mock-Up*)
2. upravljanje podatkov o izdelku (*Product Data Management*) in
3. upravljanje podatkov v celotni življenjski dobi izdelka (*Product Life-cycle Management*).

Zagotovo moramo omeniti še *Enterprise Resource* (ERP), ki je poslovni informacijski sistem, katerega komponente so vsi ostali informacijski sistemi (PLM, PDM, WMS, ...) ali pa so z njim neposredno povezani ([link](#)).

DMU je izraz, ki se v zadnjih letih uporablja kot ključna beseda za inovativno oblikovanje izdelkov z uporabo virtualnih inženirskih tehnologij. DMU je osnova za digitalni, virtualni opis izdelka med njegovim razvojem, oblikovanjem in izdelavo, in sicer platforma za integracijo vseh omenjenih tehnologij virtualnega inženiringa. Razvoj produkta je optimiran glede časa, stroškov in kakovosti. Najboljši primer uporabe DMU v letalski industriji je Boeing, ki je zmanjšal število napak in potrebo po ponovnem razvoju posameznih komponent za 70-80%, s čimer je prihranil 100.000 ur projektiranja.

Primer Boeing 777:

- Prvo komercialno letalo 100% konstruirano z uporabo sistemov CAD.
- 3 milijoni delov.
- 900 dobaviteljev iz 17 držav.

Največja napaka naleganja med sestavnimi deli na prvem 777 je bila 0.6mm (pri prejšnjih letalih 12.5mm).

Funkcije DMU:

- Kompletna 3D vizualizacija.
- Orodje za sodelovanje (vsi inženirji vidijo dele in sklope, kose konstruirajo in vnašajo različni člani ekipe).
- Analiza sklopov:
  - Testiranje prekrivanja komponent v sklopu.
  - Omogoča simulacije funkcionalnosti (kinematika).
  - Omogoča trdnostne simulacije (FEM, CFD).

Kompleksnost modelov in analiz, ki imajo za osnovo veliko heterogenih podatkov, pomeni težave pri digitalnem pretoku informacij. Tehnologija PDM ponuja rešitev za zanesljivo shranjevanje in spremljanje podatkov, tako da so prave informacije in podatki ob pravem času na voljo pravi osebi v projektantski ekipi.

V zadnjih letih so vodilni proizvajalci sprejeli PLM kot sredstvo za močno in zanesljivo vodenje poslovne strategije in podporo inovacijam v procesu razvoja izdelkov. DMU je ključna komponenta v sistemu PLM, ki podpira proces odločanja pri razvoju izdelka. DMU omogoča projektni skupini, da ustvari digitalni model izdelka in njegovo okolje v realnem času, ga analizira in izlušči ključne dejavnike, ki določajo njegovo zanesljivost, kakovost, lastnosti in ceno, kar skrajša čas in stroške razvoja izdelka, ob hkratni optimizaciji kakovosti in izdelave izdelka. Systemske rešitve PLM so bistvenega pomena za ustvarjanje okolja za sodelovanje, v katerem ima inovativnost izdelkov osrednje mesto v procesu njihovega razvoja. Ko je DMU popolnoma integriran z naprednimi orodji PLM, so prednosti in prihranki izraziti.

Kaj je PLM?

- PLM ni tehnologija, ampak kompleksen informacijski sistem za upravljanje z zelo heterogenimi podatki, vsemi podatki - od zamisli do razgradnje izdelka.
- PLM je strateški pristop, ki uporablja znan nabor poslovnih rešitev, ki podpirajo skupno upravljanje, razširjanje in uporabo informacij o izdelku.
- PLM je podpora razširjenemu podjetju (naročniki, kupci, partnerji za oblikovanje, razvoj, dobavo itd.)
- PLM pomeni vključevanje ljudi, procesov, poslovnih sistemov in informacij.

Primarne funkcije, ki jih povezuje PLM so na naslednji sliki.



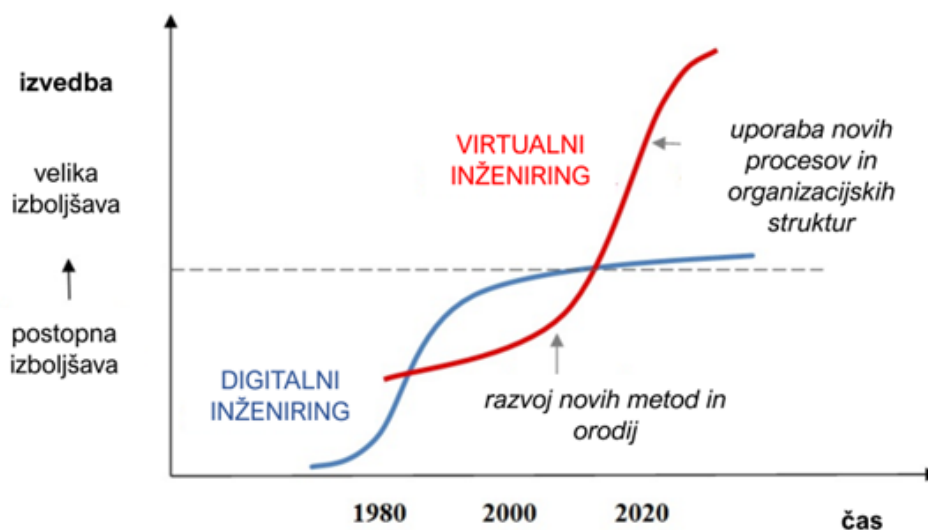
Slika 42: Primarne funkcije povezane v PLM.

Industrijski razvoj, predvsem vsled razvoja novih materialov in tehnologije izdelave, rezultira v vedno bolj kompleksnih izdelkih in kompleksnih procesih, a hkrati zelo zmanjšuje čas od razvoja do trga. V zadnjem času se uvajajo strategije za izboljšanje celotnega razvojnega procesa z manj testiranja fizičnih prototipov, z virtualizacijo montaže, uporabe simulacij in analiz na digitalnih modelih. Kljub uspešni uporabi

digitalnega inženiringa, vključevanje naprednih IT sistemov v razvojne procese samo po sebi ne vodi do resničnega napredka: potrebujemo obvladovanje vseh faz razvoja izdelka na višjem nivoju ob hkratnem obvladovanju kompleksnosti izdelkov in procesov.

Ker "težav, s katerimi se soočamo, ni mogoče rešiti z enakim razmišljanjem s katerim smo jih ustvarili" (Albert Einstein), je potrebna nova inženirska metodologija, ki vključuje pomembne tehnološke in tudi poslovne rešitve za izboljšave izdelkov, procesov in storitev. To je osnovna ideja virtualnega inženiringa, ki vsebuje vrsto znanstvenih, tehnoloških in organizacijskih aktivnosti, seveda z uporabo naprednih informacijskih in komunikacijskih metod in orodij, in s poudarkom na integraciji procesov in sistemov ter interaktivni vizualizaciji novo razvitih vmesnikov med človekom in strojem. Implementacija virtualnega inženiringa pomeni, da se oblikovanje in vrednotenje izvaja sočasno, s čemer omogočimo zgodnje vrednotenje izdelkov, olajšamo odločanje in omogočimo optimizacijo izdelkov v razvoju.

Vključevanje inovacij in tehnologij za izboljšanje procesa razvoja in ima obliko črke "S" (slika 46), kjer krivulji prikazujeta zmogljivosti digitalnega in virtualnega inženiringa skupaj s predhodnimi procesi. Ko se začne uporabljati nova metodologija, virtualni inženiring, se zmogljivost najprej izboljša počasi, saj potrebujemo čas za učenje in prilagoditev novih metod in orodij (zmeda, odpor in krivulja učenja). Po osvojitvi metod se uspešnost poveča, saj nova metodologija pridobiva na veljavi, ustvarja rezultate, viša dodano vrednost in postane širše sprejeta. Nova metodologija ustvarja novo krivuljo uspešnosti procesa, ki je drugačna od sedanje. Uporaba digitalnega inženiringa je zdaj na robu krivulje (črtkana črta na sliki) in uveljavlja se nova korenita sprememba.



Slika 43: Zmogljivost prenosa tehnologij v prakso.

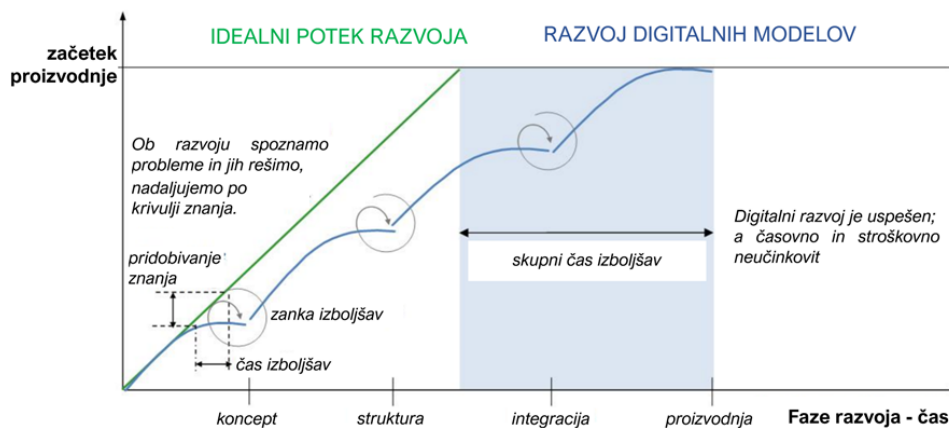
Vir: Virtual Engineering: principles, methods and applications.

Eden glavnih izzivov, da lahko podjetja ostajajo konkurenčna, je hitra izmenjava med pridobivanjem znanja in razvojem tehnologij, kar se dogaja približno na vsakih 3–5 let na mnogih področjih (programsko inženirstvo, elektronika in telekomunikacije). To časovno obdobje je v inženirstvu običajno krajše, kot pa uvajanje novih tehnologij v poslovne procese.

Uporaba naprednih in tudi dragih tehnologij navidezne resničnosti je za inženiring nekako omejena na specifične naloge v razvoju izdelka, ki so podprte večinoma kot dodatna funkcija različnih sistemov CAx. V zadnjih letih so bile razvite nove in cenejše interaktivne možnosti tehnologij navidezne resničnosti za interaktivne simulacije funkcionalnih lastnosti in oblikovnih dosežkov. Obstaja vse več orodij za funkcionalne, montažne in ergonomske analize na digitalnem modelu. Trenutne raziskave na področju navidezne resničnosti so usmerjene v razširitev uporabnosti na različnih področjih in prilagoditev na današnje večje računalniške in grafične moči ter hitrosti mrežne infrastrukture. Cilj je predvsem doseči znatno zmanjšanje časa razvoja izdelka z zgodnjim zaključevanjem koncepta izdelka z ostalimi dejavnostmi „načrtovanje-izdelava-preizkušanje“ in dodelitvijo potrebnih resursov.

Če bolj natančno pogledamo zgodnjo fazo razvoja izdelkov, se kot ključni problem izkazuje problem negotovosti. Bolj negotove in nedorečene so dejavnosti na začetku razvoja, več sprememb lahko pričakujemo med razvojem. Znano je, da so spremembe v poznejših fazah razvoja stroškovno intenzivne in jih je težko izvesti, saj potrebujemo več časa za prilagajanje drugim aktivnostim, ki se izvajajo sočasno. V industrijskem okolju je zgodnje reševanje negotovosti prepoznano kot skupna dejavnost, za katero so značilne različne ciklične zanke »načrtovanje-izdelava-testiranje« in zelo iterativni postopek, ki temelji na poznavanju in izkušnjah razvoja izdelka in doseganju želene kakovosti.

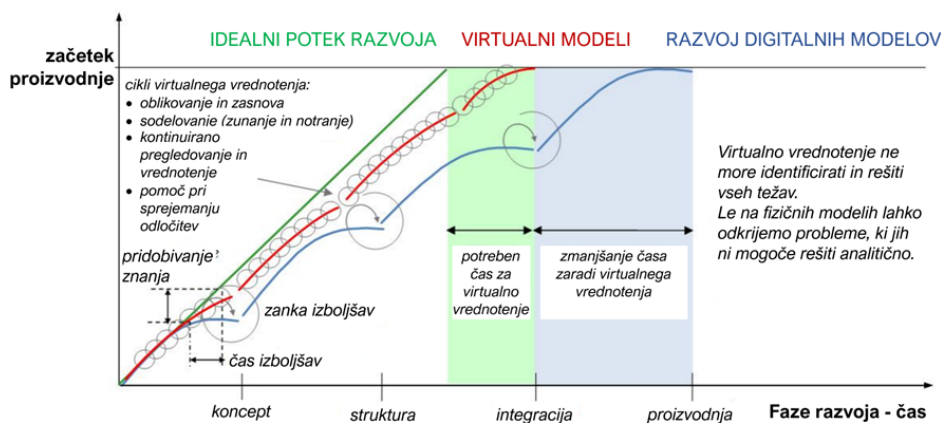
Virtualni inženiring v zgodnjem razvoju izdelka pomeni učenje, predvsem, kako hitro poznamo izdelek dovolj, da ga lahko izpeljemo v končno zasnovo. Sedanja oblikovalska in inženirska praksa vključuje široko uporabo digitalnih modelov, ki so koristni, a niso posebej učinkoviti za testiranje in učenje. Po izdelavi digitalnih modelov se ugotovijo in odpravijo težave, ki hkrati omogočajo strmejšo krivuljo pridobivanja znanja. Reševanje problemov s testiranjem pomeni zamudne iteracije reševanja, saj probleme simuliramo, analiziramo, testiramo in rešujemo zaporedno. Ta postopek, od zgodnjih prototipov pa do potrjevanja izdelka pomeni razvojno pot izdelka, ki ne sledi idealni poti znanja in potrebnega časa za pridobivanje znanja.



Slika 44: Koncept oblikovanje-izdelava-testiranje z digitalnimi modeli.

Vir: prirejeno po Ovcharova: Virtual Engineering: principles, methods and applications.

Uporaba virtualnih prototipov omogoča znatno skrajšanje časa razvoja izdelka, ki je odvisen tudi od rešitev in postopkov za kreiranje navideznega prototipa iz digitalnega modela. Ker se procesi virtualne izdelave in potrjevanja rešitev v razvoju izdelka pojavljajo sočasno, je število učnih ciklov večje, učni čas pa bistveno krajši. Kot rezultat, je razvoj izdelka optimiran, potrebni čas sprememb in razvoja izdelka se skrajša. Uporaba navidezne resničnosti kot okolja za vizualizacijo in potrjevanje omogoča razvijalcem, dobaviteljem, proizvajalcem in naročnikom, da dejansko vodijo razvoj izdelka od njegove specifikacije do konca razvoja in ga realno ovrednotijo glede na lastnosti in zmogljivosti.



Slika 45: Koncept oblikovanje-izdelava-testiranje z virtualnim inženiringom.

Vir: Prirejeno po Ovcharova: Virtual Engineering: principles, methods and applications.

Osnovna ideja virtualnega inženiringa:

**IZDELATI KAKOVOSTEN IZDELEK IZ PRVE**

## Literatura

- K. Shimada: Introduction to CAD/CAE Tools, Carnegie Mellon University, ZDA, 2017  
N. Mole: Računalniška analiza konstrukcij, prosojnica predavanja, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo,  
[www.lnms.si/LNMS-slo/rak/2017/pred-RAK.pdf](http://www.lnms.si/LNMS-slo/rak/2017/pred-RAK.pdf)  
J.G. Ovcharova, A. Semenenko: Virtual Engineering Specific Topics, Institut für Rechneranwendung in Olanung  
un Konstruktion, Universität Karlsruhe, 2015  
B. Jerman: Varnost v strojništvu, Fakulteta za strojništvo Ljubljana, predavanja, 2021  
J.G. Ovcharova: Virtual Engineering: principles, methods and applications, Design 2010, Dubrovnik, 2010  
A. Bakker: Applied Computational Fluid Dynamics, [www.bakker.org](http://www.bakker.org), 2008





# VIRTUALNI INŽENIRING I. KOMPONENTE VIRTUALNEGA INŽENIRINGA, ZAPISKI PREDAVANJ

GORAZD HREN

Univerza v Mariboru, Fakulteta za energetiko, Krško, Slovenija  
gorazd.hren@um.si

Zapiski predavanj so namenjeni študentom, ki se vsakodnevno in vedno bolj srečujejo z uporabo razvojnih računalniških orodij pri designu izdelkov. Izredno kakovostne in tudi kompleksnejše računalniške aplikacije omogočajo simulacije in analize inženirskih rešitev preden so te implementirane kot prototipi ali končni izdelki. Virtualni inženiring najprej tvorijo komponente za ustvarjanje geometrije, sistemi CAD in povratni inženiring s sistemi skeniranja, ki predstavlja osnovo za nadaljnje postopke razvoja izdelkov. Naslednje komponente so izdelava virtualnih prototipov v navideznem okolju ali fizičnih prototipov, katerih izdelava je dandanes večinoma izvedena s 3D tiskom. Izrednega pomena v razvoju izdelkov so numerične simulacije, ki omogočajo analize -trdnosti, dinamike tekočin in gibanja mehanizmov - glede na robne pogoje. S pridobljenimi podatki lahko načrtujemo proizvodnjo, logistiko, kontrolo kakovosti, ergonomijo, marketing, preden gre izdelek v končno izdelavo. Vse te komponente povezujejo informacijski sistemi DMU, PLM, ki omogočajo in tudi določajo organizacijsko strukturo razvojnega dela, opisanem v zadnjem poglavju: Virtualni razvoj izdelkov.

DOI  
[https://doi.org/  
10.18690/um.fe.1.2024](https://doi.org/10.18690/um.fe.1.2024)

ISBN  
978-961-286-865-9

**Ključne besede:**  
virtualni inženiring,  
sistemi CAD,  
povratni inženiring,  
numerične simulacije,  
virtualni razvoj izdelkov



Univerza v Mariboru

---

Fakulteta za energetiko

