

A 3D finite element analysis (FEA) simulation of a mechanical part, likely a bracket or arm. The part is shown in a dark grey color with a green and yellow stress distribution on its inner surface. The background is a blue gradient with a wireframe mesh of a sphere and other geometric shapes, suggesting a simulation environment.

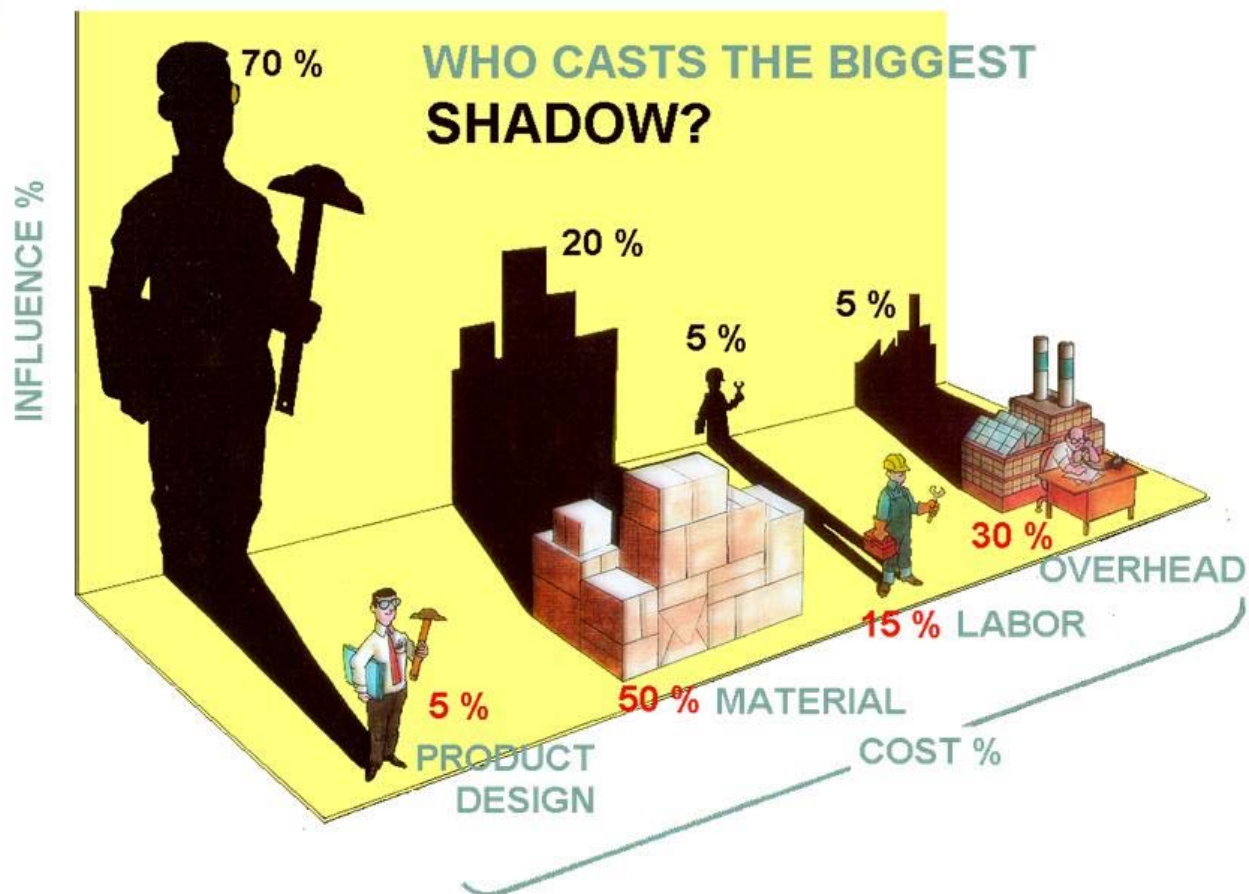
Modelovanje i simulacija procesa deformisanja

Nastavnik:

dr Mladomir Milutinović, van.prof

Asistent:

dr Dejan Movrin, docent

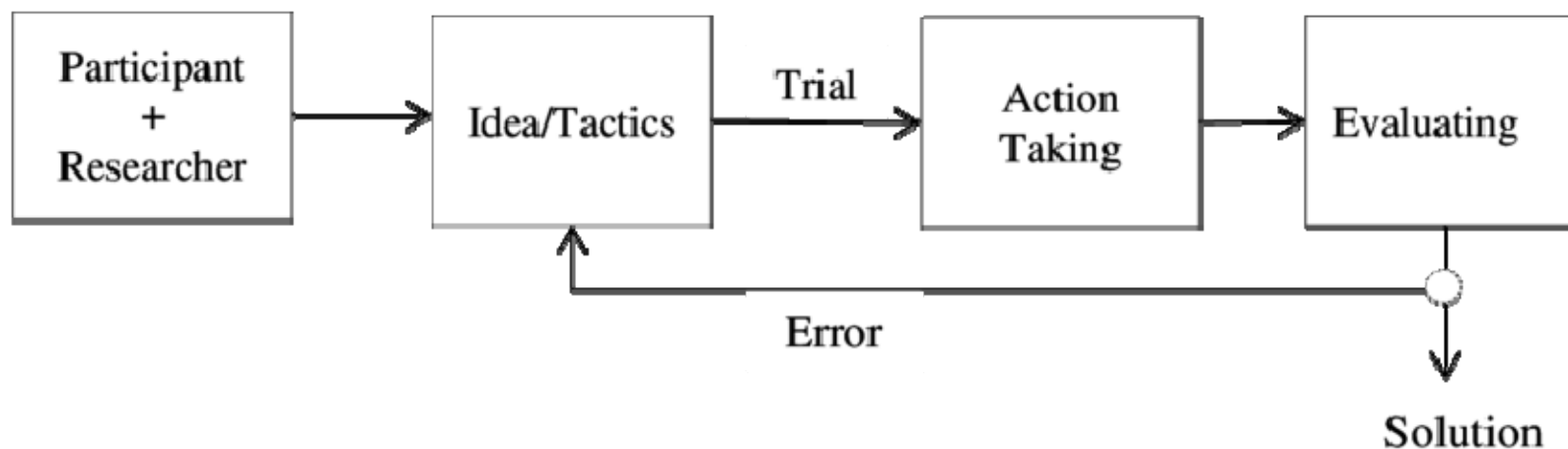
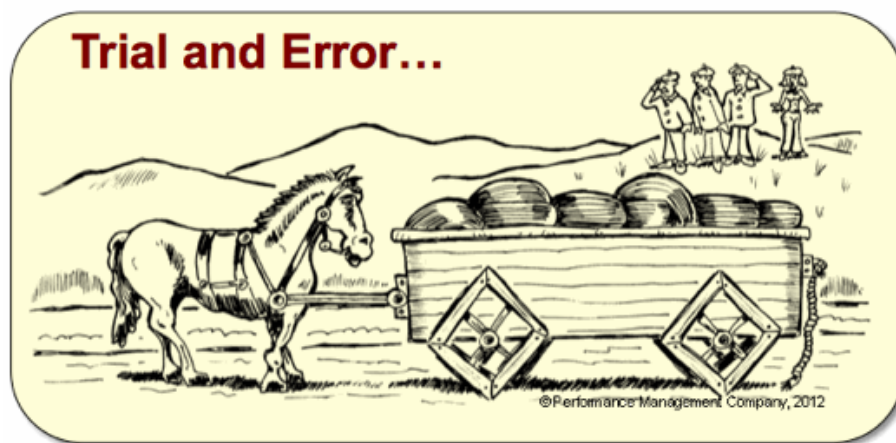


Source: Ford Motor Company



Tradicionalno – klasično projektovanje:

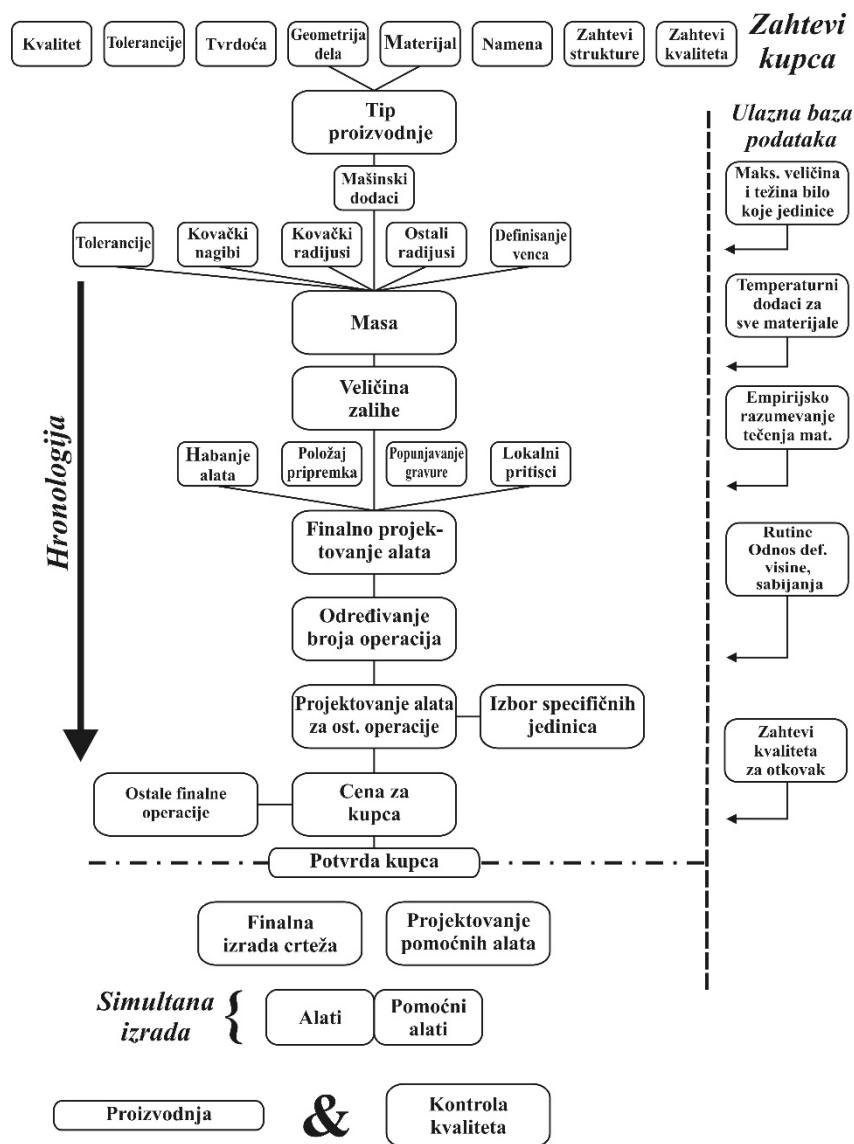
Trial and error - Probaj i popravi !!!!



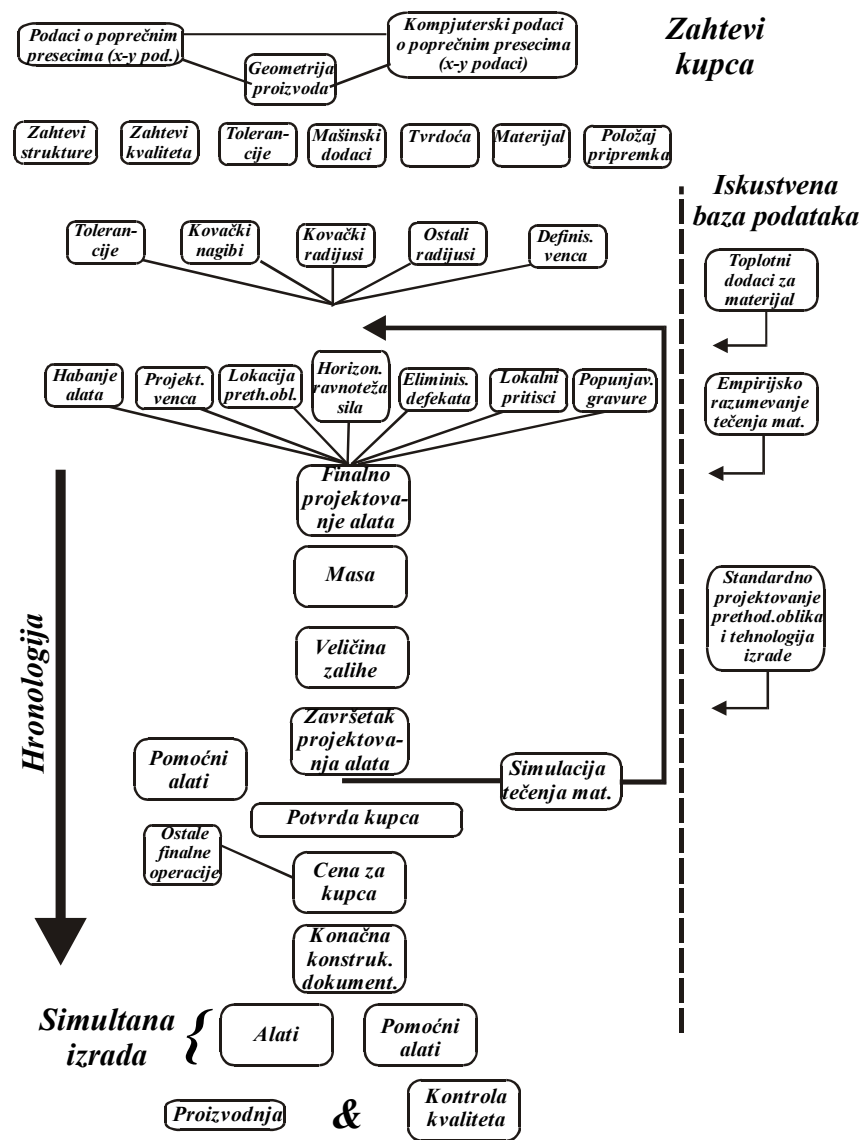


Trial and error - Probaj i popravi





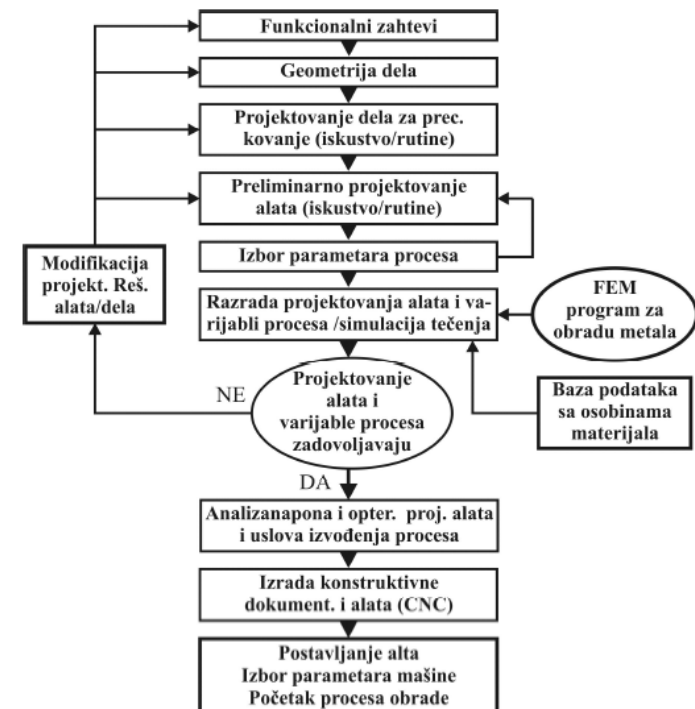
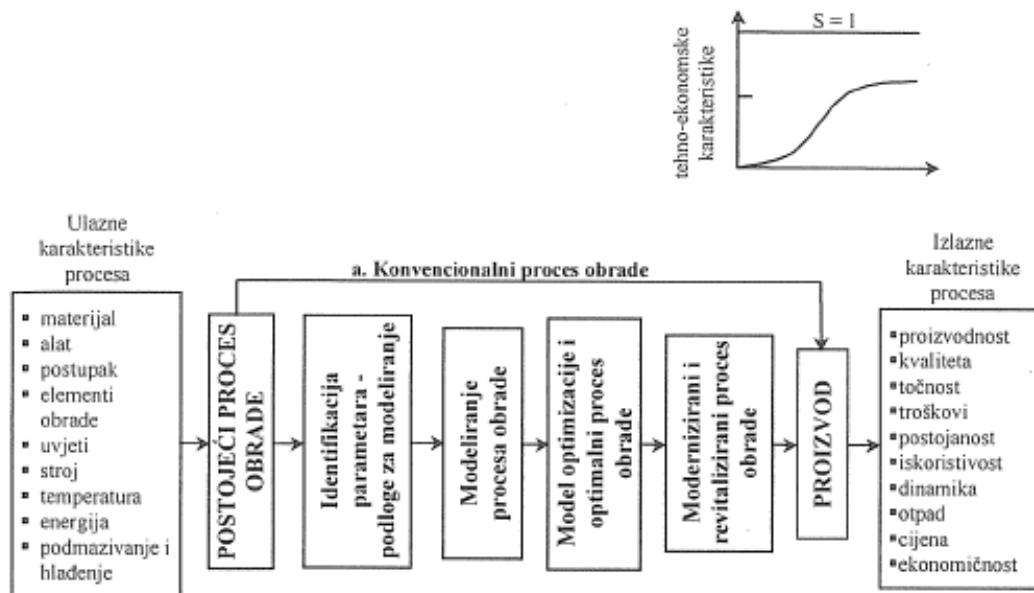
Konvencionalni način projektovanja alata



Procedura projektovanja alata sa integrisanim CAD sistemom i simulacijom procesa



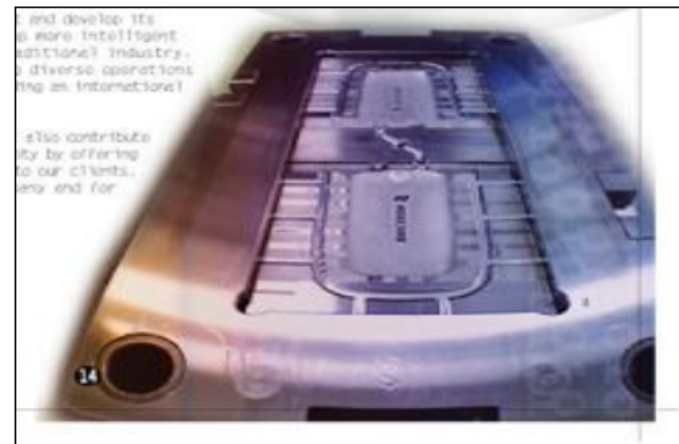
- Projektovanje modernih procesa obrade zahteva analizu svih tehničko-tehnoloških parametara procesa i primenu naučnih metoda u cilju **modelovanja i definisanja optimalnih uslova obradnih procesa i sistema.**
- Glavni ciljevi modelovanja i optimizacije obradnih procesa su:
 - povećanje proizvodnosti, ekonomičnosti, ukupnog kvaliteta proizvoda ili pojedinih segmenata (obrađene površine, postojanosti alata, itd.)
 - smanjenje utroška materijala, energije, vremena obrade i troškova obrade po jedinici proizvoda.





This customer has the following molding capacity:

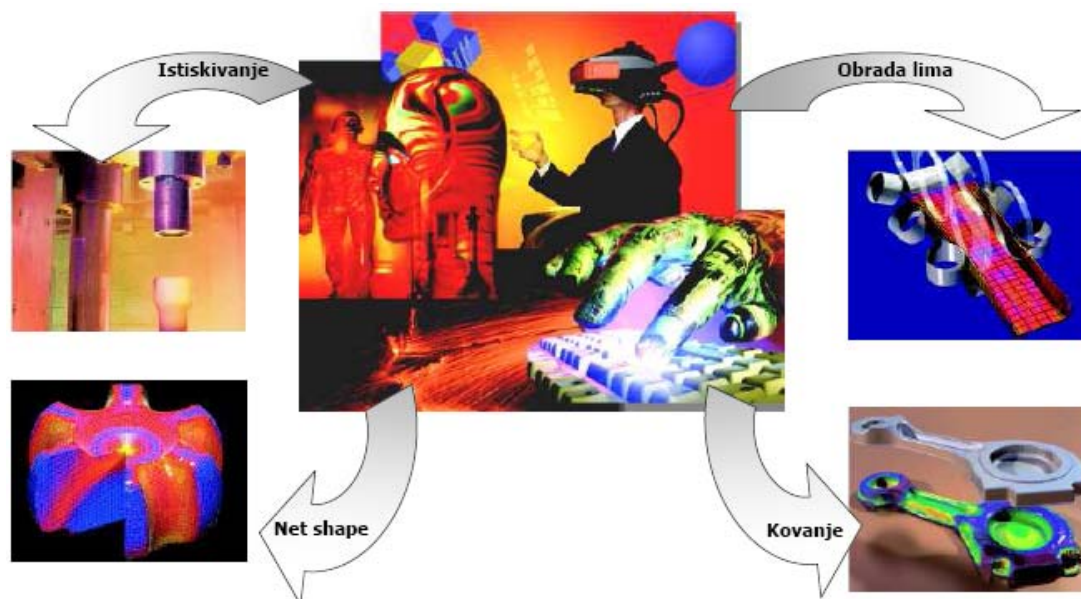
- Building mold for big, medium and small size. Annually 600 molds.
 - Average mold design change cost: 300 € per trial, including equipment, man-hour, plastic material, energy consumption.
 - Simulation helps to save 2 mold trials in average:
 - $2 \times 300 \times 600 = 360.000$ €
- **360.000 € saved in average annually.**

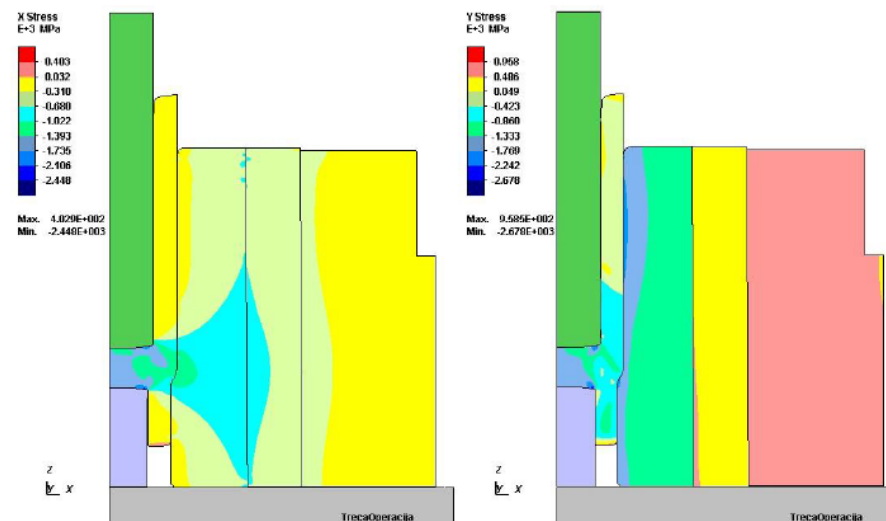
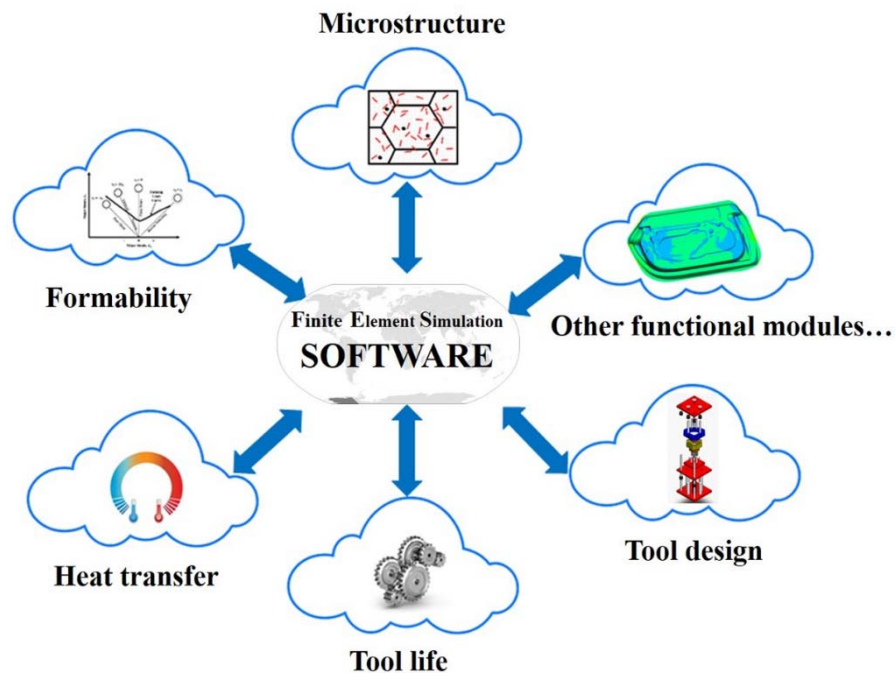




Prednosti primene modelovanja i simulacija:

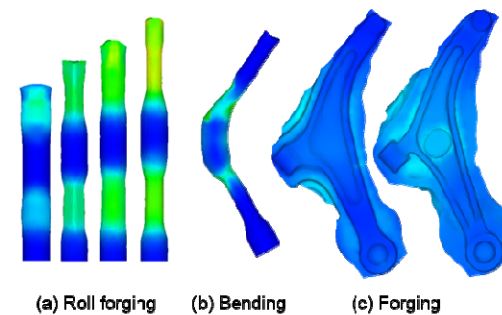
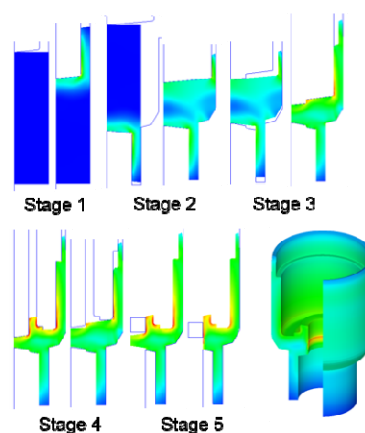
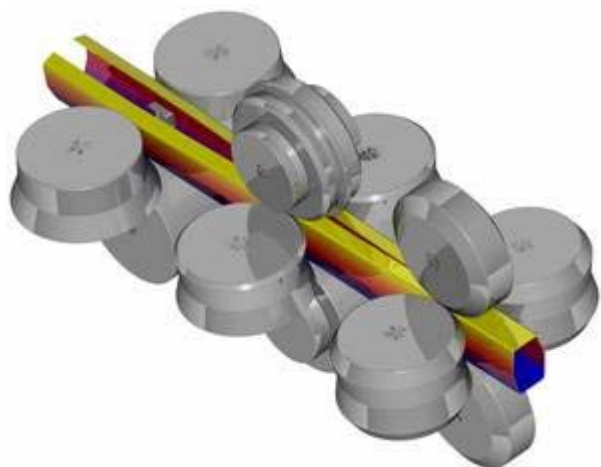
- ✓ jeftinija od tradicionalnog projektovanja „*trial and error*“ na proizvodnoj opremi i alatima;
- ✓ modifikacije na modelima alata su jeftinije i zahtevaju manje vremena od izmena na proizvodnim alatima;
- ✓ modeliranje i simulacija obezbeđuje mnoštvo informacija o procesu: deformaciona sila, tečenje materijala u različitim fazama procesa, eventualni defekti, promene mikrostrukture;
- ✓ neophodne informacije se znatno brže dobijaju, nego brojnim pokušajima na proizvodnoj opremi.





❖ 2D, Full automatic simulation

❖ 3D, Partial automatic simulation

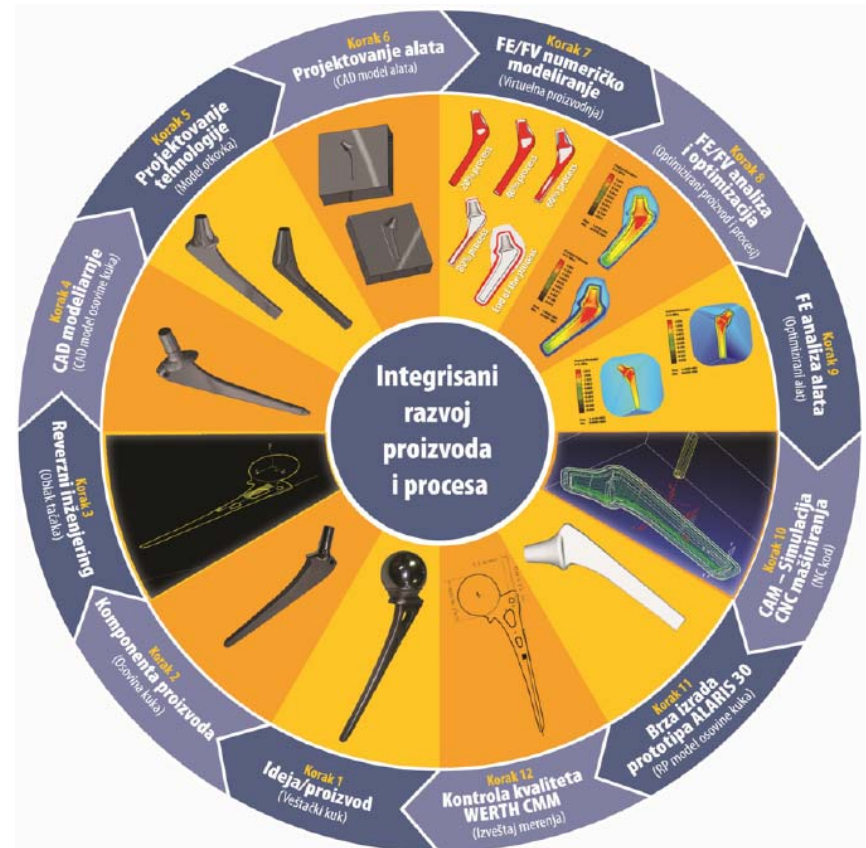




INTEGRISANI RAZVOJ PROIZVODA I PROCESA

Zašto?

- Sve oštrija konkurencija na globalnom tržištu
- Individualizacija proizvoda
- Skraćenje vremena plasmana proizvoda na tržište ("Time to market")
- Smanjenje vremena razvoja
- Kraći životni ciklus proizvoda
- Visoki zahtevi u pogledu kvaliteta proizvoda
- Zahtevi u pouzdanosti isporuke (rokovi)
- **80% cene proizvoda određeno je u ranoj fazi njegovog životnog ciklusa**
- Brzo reagovanje i donošenje odluka
- Optimizacija proizvoda sa aspekta kvaliteta i pouzdanosti, u najkraćem mogućem vremenu, i sa minimalnom cenom.
- Uslovi zaštite čovekove okoline



Idealni proces projektovanja za dostizanje ovakvih ciljeva mora funkcionisati u okruženju za virtuelni razvoj proizvoda, gde projektni timovi, celo proizvodno preduzeće, i dobavljači komponenata i usluga, sarađuju i imaju brzi pristup kompletnim i ažuriranim projektnim informacijama.

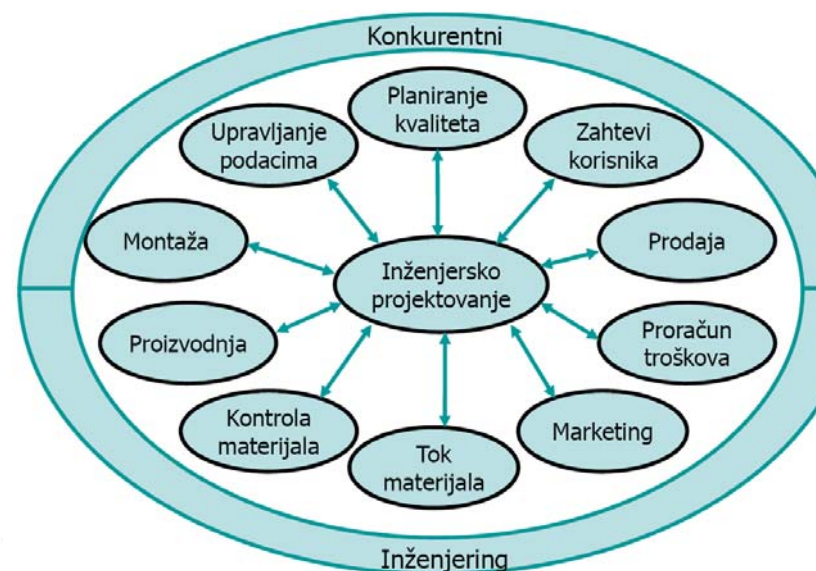
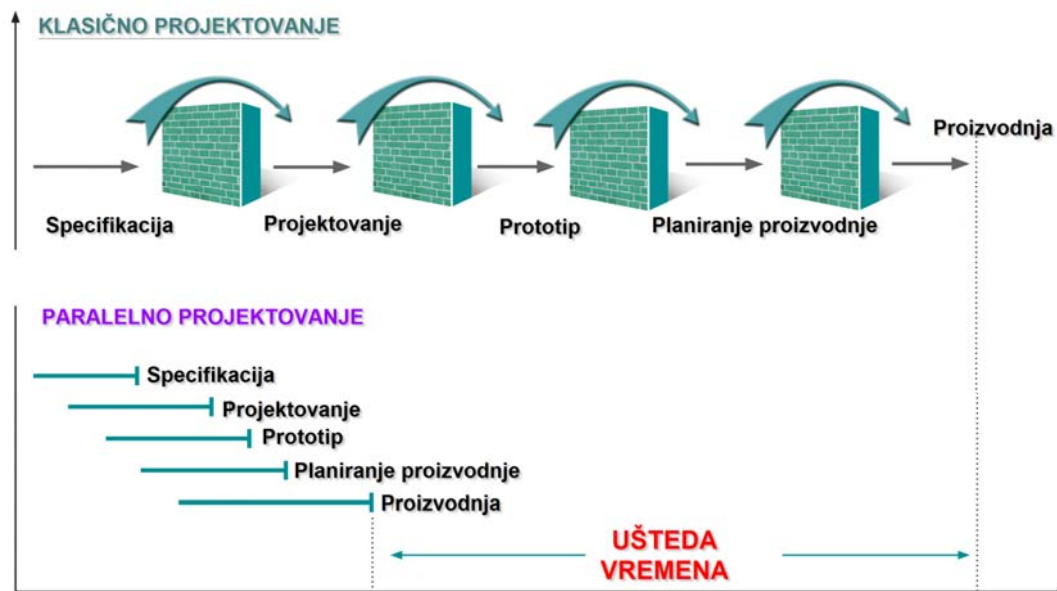


KONKURENTNI INŽENJERING

(CE – Concurrent Engineering, SE-simultaneous engineering)

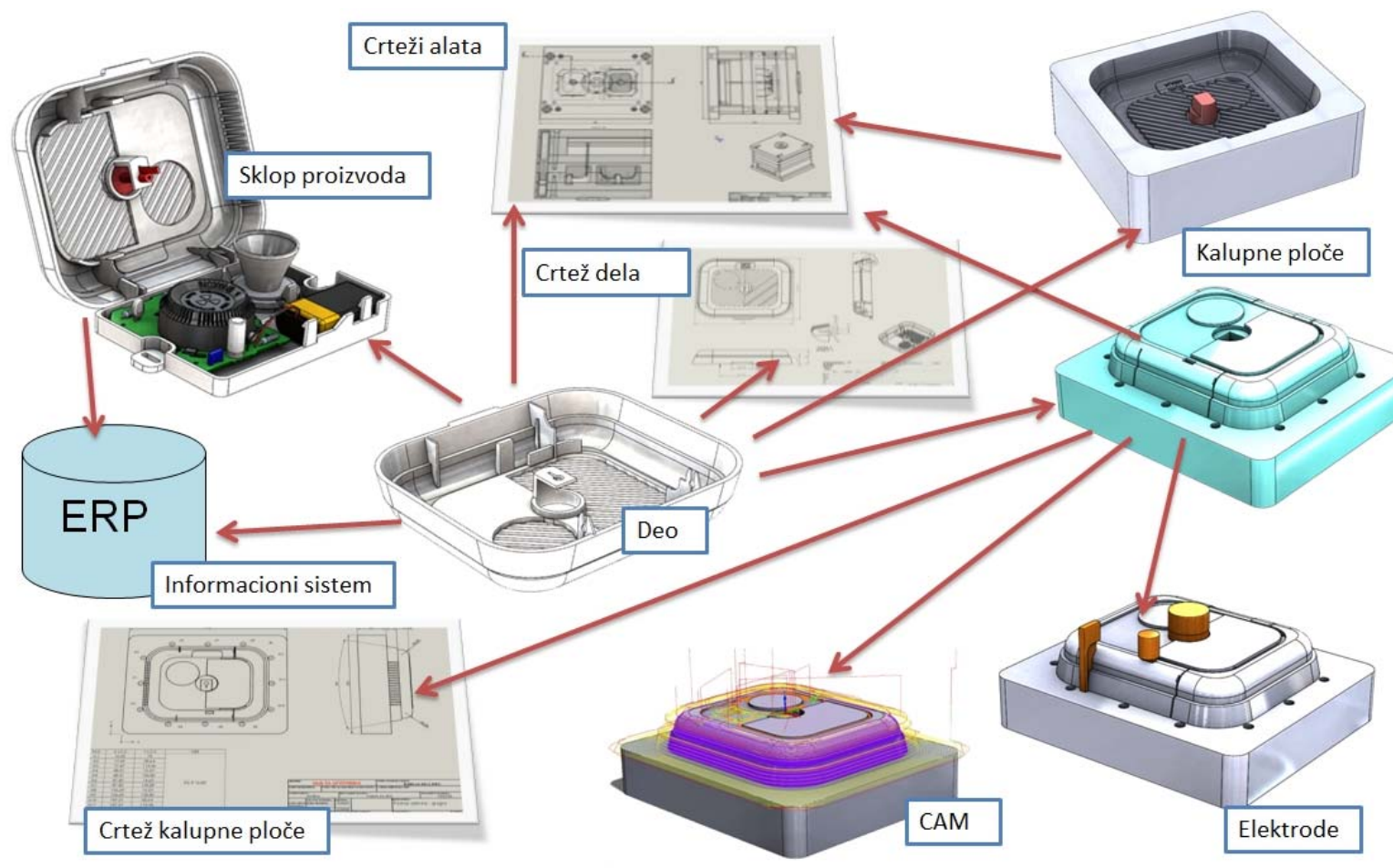
Konkurentni inženjering je poslovna strategija koja zamenjuje tradicionalni razvoj proizvoda i procesa novim pristupom u kojem se projektne i ostale aktivnosti izvode paralelno, uzimajući u razmatranje sve relevantne parametre procesa, koji imaju uticaja na razvoj proizvoda, u ranoj fazi, pre same proizvodnje.

- Visoki stepen paralelnog odvijanja sekvenci razvoja proizvoda.
- Postojanje jedne baze podataka koja je na raspolaganju svim učesnicima procesa.





KONKURENTNI INŽENJERING - CE





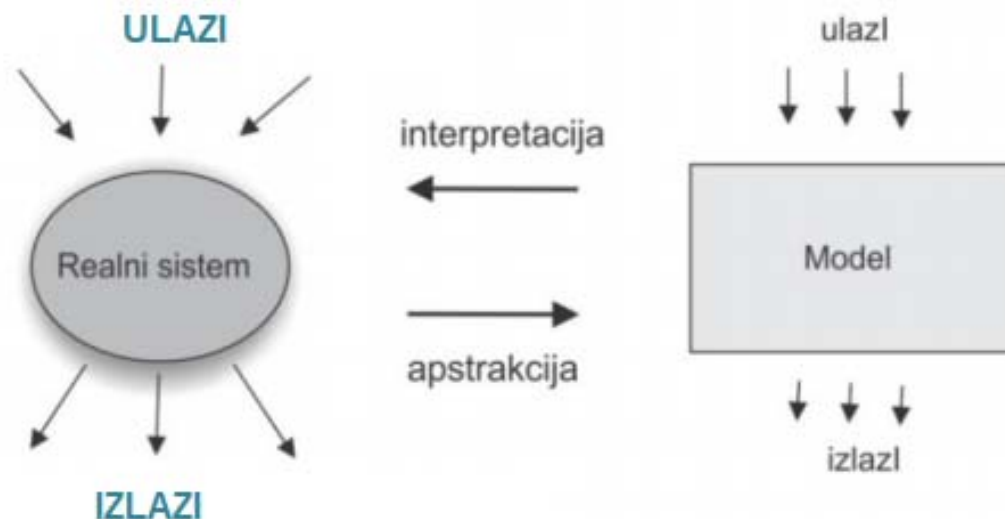
MODELOVANJE (MODELIRANJE)

- opšte -

Modelovanje je jedan od osnovnih procesa ljudskog uma i izražava našu sposobnost da mislimo i zamišljamo. Na osnovu iskustva i znanja, čovjek pomoću apstrakcije razvija model koji odgovara realnom sistemu.

Modelovanje predstavlja apstrakciju tj. postupak zamene realnog sveta (sistema) odgovarajućim modelom sa ciljem da se dođe do određenog saznanja.

Rezultat modelovanja je **model**. Model je pojednostavljena i idealizovana slika realnosti.





MODELOVANJE (MODELIRANJE)

- opšte -

Suština modelovanja se zasniva na uočavanju sličnosti između dva objekta ili sistema.

Sličnost objekata ili sistema može biti:

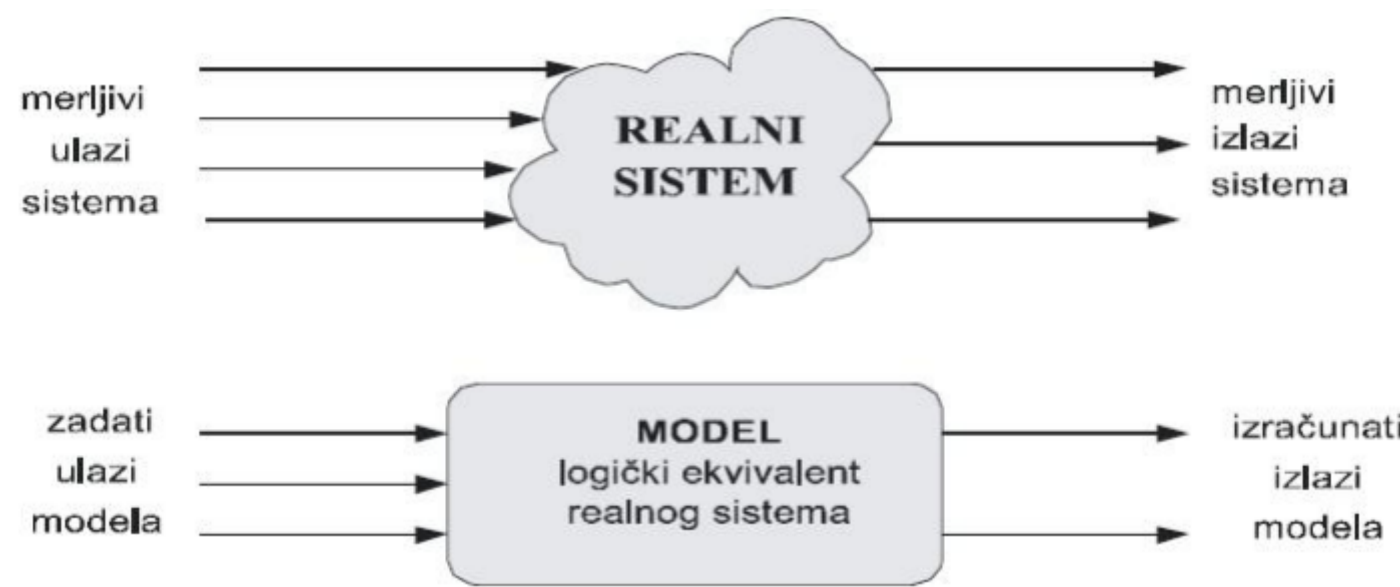
- **spoljašnja**, ili
- da se odnosi na **strukturnu** sličnost spolja različitih sistema, a sličnost može biti i u funkcionisanju (ponašanju), takođe po drugim osnovama različitih sistema

Ako se između dva objekta može ustanoviti sličnost u bilo kakvom određenom smislu, tada između tih objekata postoji odnos originala i modela. Pri tome, jedan od objekata je **original**, a drugi je **model**.



Model – pojam, definicija

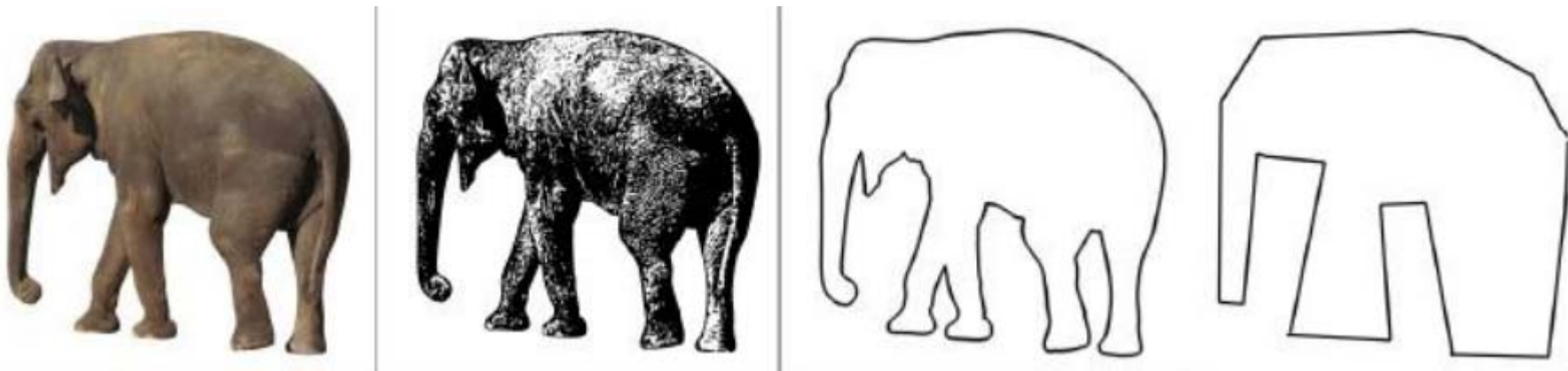
- ❑ **Model** je opis realnog sistema sa svim onim karakteristikama koje su relevantne iz našeg ugla posmatranja
- ❑ Matematički ili fizički sistem koji podleže specifičnim pravilima, a koristi se za razumevanje fizičkih, bioloških i društvenih sistema sa kojima je u određenoj analogiji” (McGraw-Hill Dictionary of Scientific and Technical Terms).
- ❑ Originalno, reč vuče korene od latinskih reči modellus tj. modulus (mera, standard) i modus (način, mera).





Model – pojam, definicija

- Model treba da bude što verniji prikaz realnog sistema!!!!!!
- Kao apstrakcija realnog sistema, model treba da zadrži samo one osobine originala koje su značajne za realizaciju cilja modela (istraživanja) !!!!!!!
- ✓ Nivo apstrakcije (uprošćavanja) utiče na validnost modela tj. na uspešnost predstavljanja realnog sistema preko modela.
- ✓ Isuviše složeni modeli su skupi i njihova primena nije adekvatna dok suviše prosti modeli ne predstavljaju realni sistem sa dovoljnom preciznošću .



“Koji je model najbolji? Onaj koji je najjednostavniji, ali ne suviše jednostavan”(Albert Einstein)



Značaj primene modela – ciljevi modelovanja

Modeliranje treba da omogući stvaranje jasne i realne predstave - **vizuelizaciju sistema**, tako da možemo da ga „vidimo“ onakvog kakav jeste, odnosno onakvog kakavog želimo da ga realizujemo. Model treba da omogući **razumijevanje sistema**, a time i bolju **specifikaciju strukture i ponašanja sistema**.

- a) Modeli omogućavaju **analizu i eksperimentisanje na složenim problemima**, što je često nemoguće u realnim uslovima.
- b) Modeli omogućavaju dobijanje rezultata koji treba da obezbede efikasnije **upravljanje realnim sistemom**
- c) Modeli omogućavaju da se **znatno skрати (ili produži) potrebno vreme za proučavanje nekih pojava** koje se sporo(brzo) odvijaju u realnosti,
- d) Model omogućava **koncentraciju na bitne karakteristike** sadržaja koji se proučavaju
- e) Modeli omogućavaju **bezbedno proučavanje nekih**, po čoveka opasnih realnih pojava,
- f) Modeli omogućavaju **eksperimentalno proučavanje pojava** čiji su realni eksperimenti vrlo skupi



Metodologija modelovanja

1. **Analiza sistema,**
2. **Sinteza sistema,**
3. **Verifikacija,**
4. **Validacija**
5. **Analiza modela ili realizacija.**

Analiza sistema, obuhvata određivanje (a) granica sistema, (b) okoline sistema, (v) relevantnu strukturu sistema, (g) relevantne attribute i stanja sistema, (d) mehanizme unutrašnjih povratnih sprega i (đ) prikazivanje sastavnih delova u strukturi ponašanja sistema.

Svaki sistem ima granice, sve što je van granica sistema predstavlja okolinu sistema. Relevantna struktura sistema dobija se dekompozicijom kada se sistem razlaže na podsisteme i delove, a potom se određuju njihovi bitni atributi, odnosno varijable stanja sistema. U toj fazi modelovanja još se određuju i mehanizmi za promenu stanja varijabli sistema



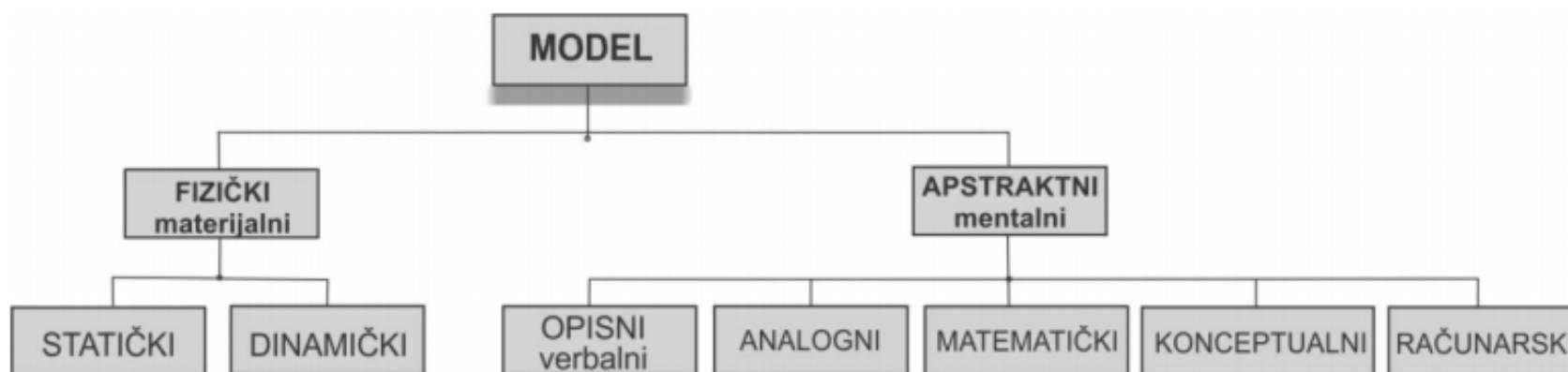
Sinteza sistema je druga faza procesa modelovanja, u kojoj se vrši strukturiranje i implementacija modela. Najvažniji deo sinteze se odnosi na izbor tipa modela.

Verifikacija modela. U fazi sinteze sistema dobija se nova struktura modela, pa je neophodno tu novu strukturu verifikovati. Proces verifikacije treba da utvrdi da li je struktura modela oblikovana onako kako je očekivano. To se postiže putem testiranja modela prema definisanim zahtevima.

Validacija modela se realizuje u četvrtoj fazi modelovanja tako što se upoređuju relevantni pokazatelji. Cilj je utvrđivanje dinamičkog ponašanja modela u definisanom vremenskom periodu.



Vrste modela



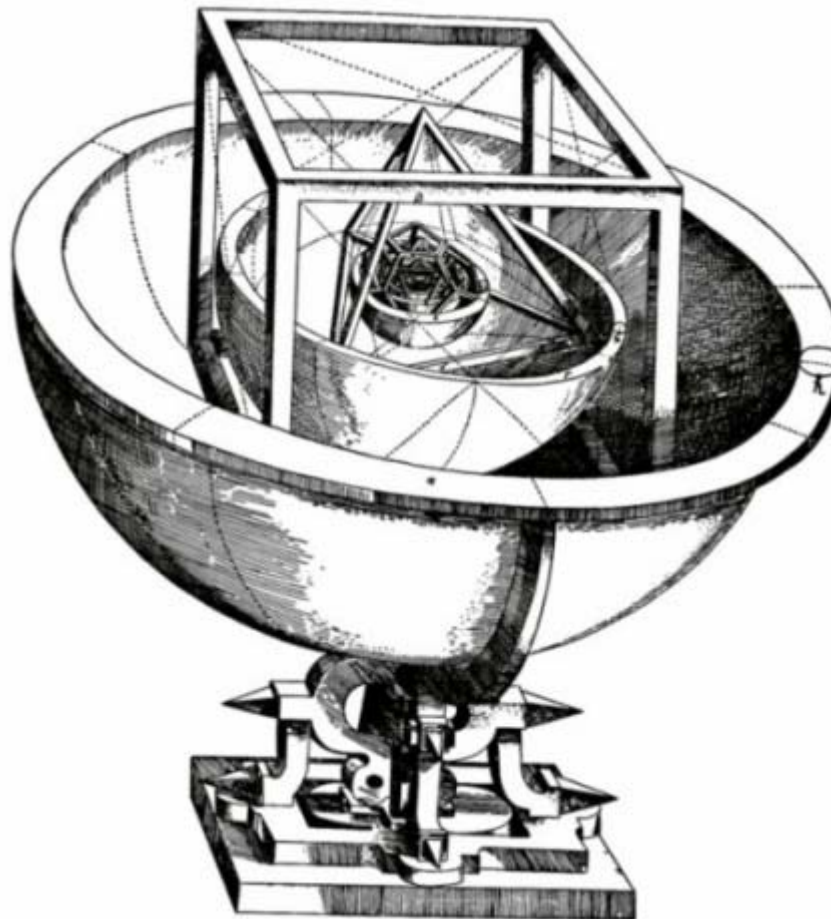
Pod terminom **fizički** misli se na materijalne modele (model automobila, broda..), a klasa **apstraktnih** modela predstavlja simboličke mentalne modele (koji mogu imati različitu reprezentaciju u zavisnosti od metode predstavljanja: od verbalnog opisa preko analogije i matematičke analitike do konceptualne predstave računarskim modelima i simulacijama).



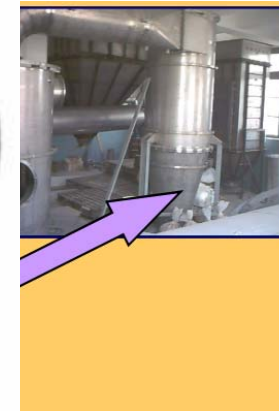
Vrste modela – fizički modeli

Fizički modeli sistema predstavljaju srazmerno umanjenu (uvećanu) kopiju realnog sistema iz koga su izdvojene bitne fizičke i funkcionalne karakteristike.

- Formiraju se na osnovu sličnosti ili fizičkih zakona.
- Različiti fizički modeli mogu postojati matematički od fizičkih objekata; naziva se analogni model.



se kaže da između njih
i mogućnost da se neki
dela i tada se on



- Statički modeli zadržavaju zavisnosti od promena u vremenskom domenu
- Dinamički aspekti nisu u vremenskom domenu
- Korišćenje fizičkih modela ograničeno troškovima i vremenom izrade.

ički menjaju u

reirajući model procesa



Vrste modela - apstraktni modeli

Apstraktni modeli

Osnov apstrakcija je promišljanje i analiza (odnosno način izdvajanja nekih osobina i svojstava predmeta od samog predmeta), pa se metode modeliranja mogu podeliti prema načinu apstrakcije pri obavljanju i prezentovanju analize.

Mentalni (misaoni) modeli su modeli nastali apstrakcijom. Predstavljaju apstrakciju koju stvara ljudski um. Omogućavaju komunikaciju među ljudima, planiranje aktivnosti itd. Ovaj model omogućuje donošenje odluke, na osnovu unapred propisanih pravila i strategije i strukture koje model sadrži.





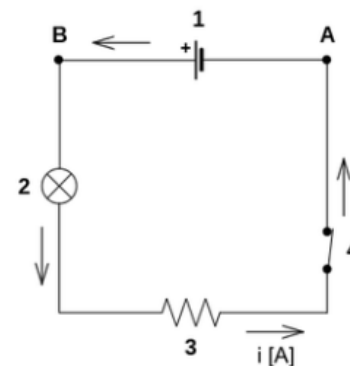
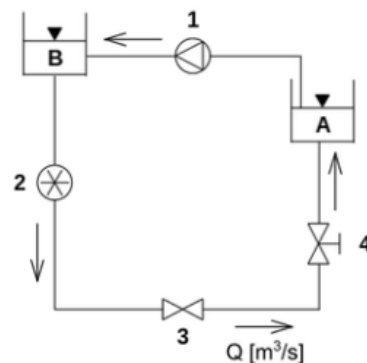
Vrste modela - apstraktni modeli

Opisni (verbalni) modeli

- Kod ovog modela analiza sistema ili njegovih delova se vrši opisno, opisivanjem u vidu teksta. Verbalni model je način predstavljanja mentalnih modela govornim jezikom. Opisni modeli su široko primijenjeni i koriste se u svakidašnjim aktivnostima.
- Osnovne mane ovog modela su ograničenost pri rešavanju složenih problema zbog mogućnosti različite interpretacije i dvosmislenosti pri shvatanju opisa, kao i proizvoljnost pri oceni značaja pojedinih faktora

Analogni modeli

- Zasnovani su na fizičkoj sličnosti i ekvivalenciji sa nekom od karakteristika fizičkog–realnog sistema, gde se putem analogije dolazi do rešenja problema.

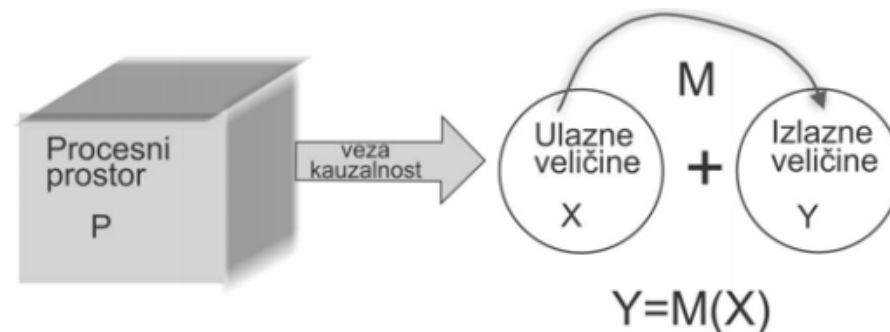




Vrste modela - apstraktni modeli

Matematički modeli

- Matematičkim modelom se pomoću matematičkih postupaka i operacija, na osnovu određenih podataka, opisuje ponašanje sistema.
 - Matematički modeli pripadaju klasi apstraktnih modela, a primenjuju se u naučnim i inženjerskim disciplinama.
 - Metodologija i struktura matematičkog modela je različita i određena prirodom realnog sistema i cilja matematičkog modeliranja.
1. Matematičko modeliranje počinje definisanjem procesnog prostora P u kojem se odvija neki proces. Posmatrani procesi mogu biti složene prirode i osnova pristupa matematičkog modeliranja je sažimanje i apstrakcija istraživanih procesa.
 2. Na određenom nivou modela u istraživanom procesnom prostoru se definišu dva osnovna skupa veličina modela, skup ulaznih veličina X i izlaznih veličina Y.
 3. Osnov matematičkog modela M je određivanje matematičko-statističkih relacija koje povezuju skup izlaznih veličina Y (koje su zavisne veličine), sa skupom nezavisnih ulaznih veličina X.

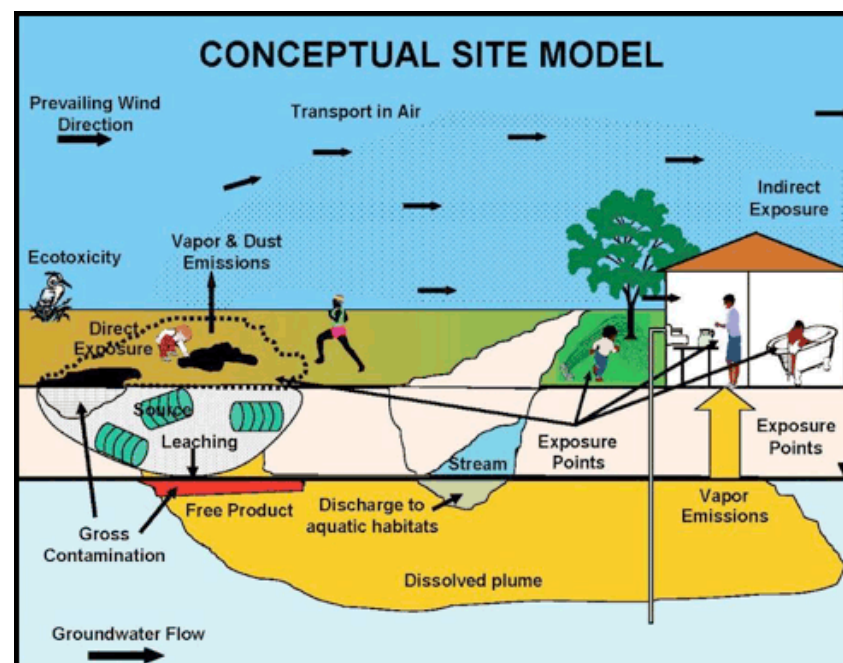
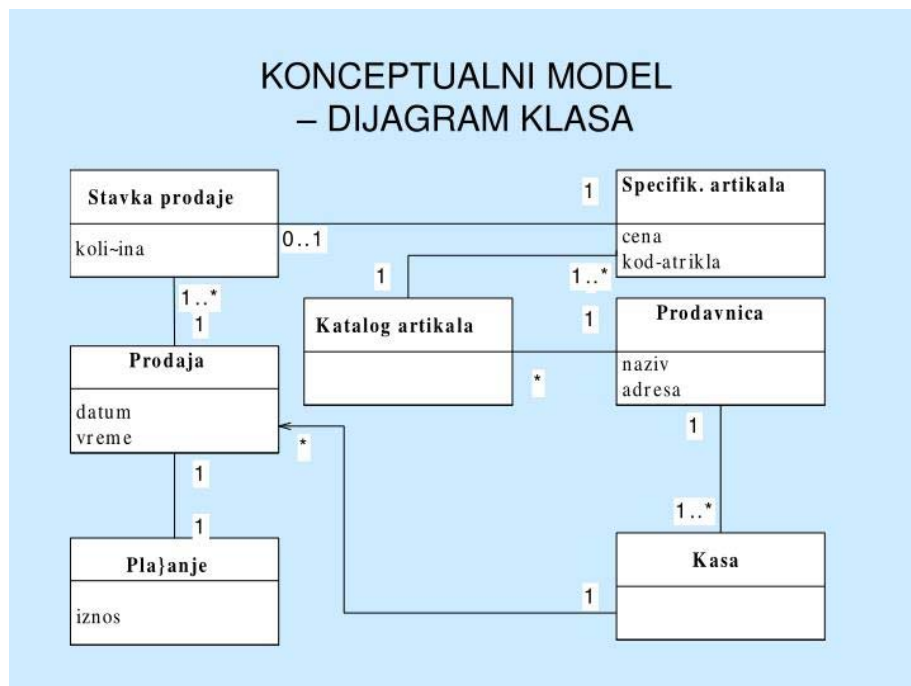




Vrste modela - apstraktni modeli

Konceptualni modeli

Konceptualni modeli nastaju na osnovu strukture logike rada sistema. Zovu se još i strukturni modeli pošto u grafičkom obliku prikazuju strukturu i pomoću nje omogućuju modeliranje. Predstavljaju osnovu za izradu računarskih modela.





Vrste modela - apstraktni modeli

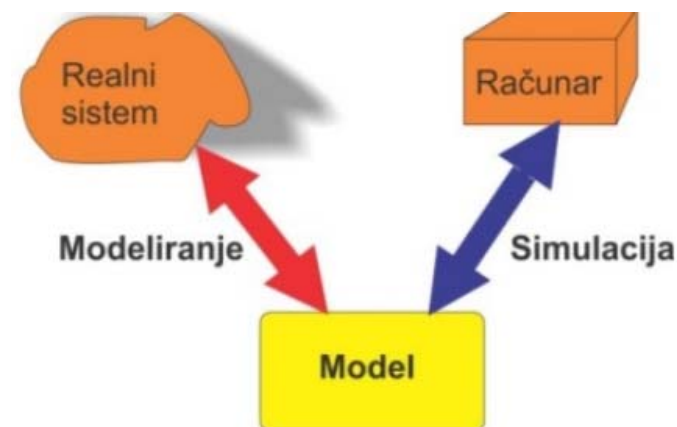
Računarski i simulacioni modeli

- Simulacioni modeli su svi oni modeli gde se „nešto“ predstavlja pomoću „nečeg drugog“. Pojam simulator označava uređaj u kome se veštački stvaraju takve prilike kakve postoje u realnom svijetu. Ako se simulacija obavlja na računaru, simulacioni modeli predstavljaju **računarske modele**.
- Objekti računarskog modela su opisani promenljivim (ulazno/izlaznim varijablama) i njihovim osobinama (atributima).
- Simulacioni modeli se mogu podeliti prema vrsti promenljivih u modelu:
determinističke i stohastičke
- **Deterministički modeli** su modeli čije se stanje može predvidjeti, tj. novo stanje je potpuno određeno prethodnim.
- **Stohastički modeli** čije se ponašanje ne može predvidjeti, ali se mogu predvideti verovatnoće promena stanja.



Simulacija

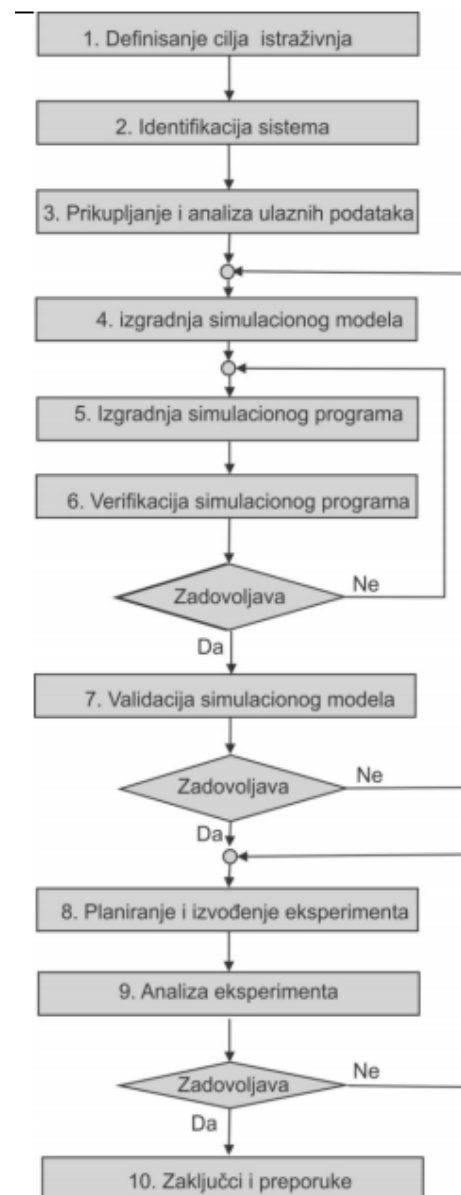
- Simulacija je prema Šenonu (Shanon, 1975) „proces dizajniranja modela realnog sistema i provođenje eksperimenata sa tim modelom radi razumijevanja ponašanja sistema ili evaluiranja različitih strategija (u okviru granica zadatih kriterijumima ili setom kriterijuma)“.
- Simulacija je proces koji uspostavlja vezu između modela i računara.
- Simulacija je eksperimentalna metoda koja omogućuje proučavanje stvarnog procesa pomoću njegovog modela.
- Model prikazuje statičko stanje sistema, odnosno stanje u jednom momentu.
- Simulacija pretpostavlja praćenje stanja sistema u vremenu. To znači da je za izvođenje simulacije potrebno definisati vremenski slijed: vremenski hodogram koji određuje hronologiju stanja sistema. Modeliranjem izrađujemo model, a simulacijom pratimo ponašanje modela.





Simulacija

- 1. Definicija cilja istraživanja-simulacione studije;
- 2. Identifikacija sistema (opis komponenata, način rada, veza sa okolinom, formalni prikaz sistema);
- 3. Prikupljanje podataka o sistemu i njihova analiza;
- 4. Izgradnja simulacionog modela (stvaranje konceptualnog modela koji adekvatno opisuje sistem);
- 5. Izgradnja simulacionog programa (izbor softverskog paketa, ili programskog jezika i stvaranje simulacionog programa);
- 6. Verifikacija simulacionog programa (da li program verno predstavlja model);
- 7. Validacija (vrednovanje) simulacionog modela. Vrlo značajna karika koja najčešće dovodi do ponovnog projektovanja modela. Validacija je provera sličnosti ili preklapanja izlaznih vrednosti iz modela i eksperimentalnih podataka.
- 8. Planiranje simulacionih eksperimenata i njihovo izvođenje;
- 9. Analiza rezultata eksperimenata (najčešće statistička analiza);
- 10. Zaključci i preporuke.





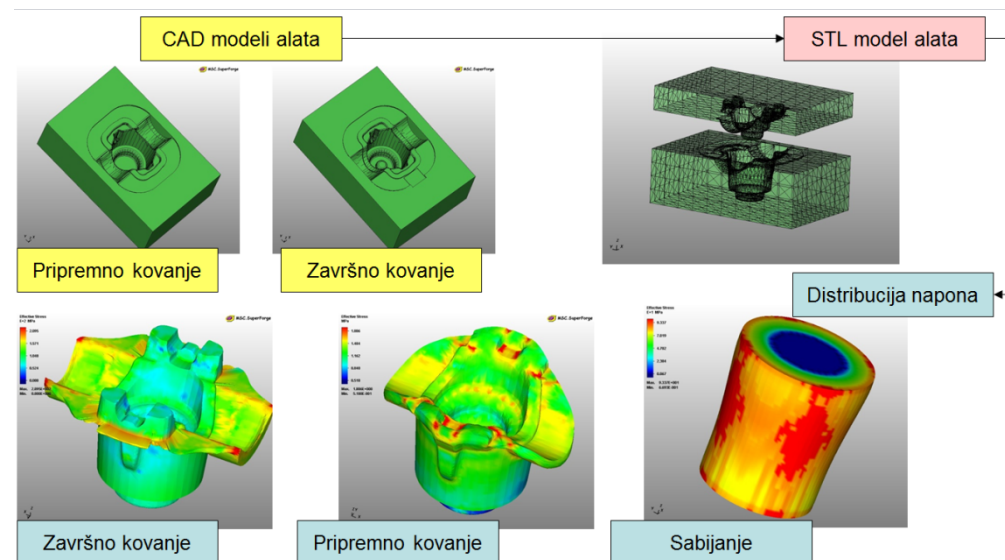
MODELOVANJE I SIMULACIJA PROCESA DEFORMISANJA

Modelovanje - generisanje fizičkog ili matematičkog modela pomoću koga se opisuje realni proces (deformisanja)

Simulacija - predstavlja vizuelizaciju modeliranog procesa, odnosno, reprodukciju ponašanja modela u toku procesa (deformisanja) *i vezana je za primenu računara.*

Modeliranje procesa obrade - aktivnosti:

- uspostavljanju veze između željenih osobina proizvoda i uslova obrade;
- uspostavljanju veze između nastalih defekata (otkaza) i uslova obrade;
- utvrđivanju optimalnih uslova obrade na osnovu izabranog kriterijuma.





MODELOVANJE PROCESA OBRADE (DEFORMISANJA)

Opšti ciljevi:

- ☐ optimizacija postojećeg procesa i povećanje produktivnosti;
- ☐ poboljšanje kvaliteta proizvoda;
- ☐ smanjenje broja pokušaja u fazi projektovanja novog ili modifikovanja postojećeg procesa ili proizvoda (brza izrada prototipova, kraći ciklus projektovanja);
- ☐ poboljšanje sistema kontrole procesa (*intelligent processing*);
- ☐ poboljšanje proizvodnih sposobnosti dobavljača za kompanije koje se bave montažom;
- ☐ projektovanje nove opreme i alata;
- ☐ sticanje znanja i edukacija (vizuelizacija procesa, proučavanje parametara procesa, naučno objašnjenje uočenih fenomena);



MODELOVANJE PROCESA OBRADE (DEFORMISANJA)

Ciljevi numeričkih simulacija u projektovanju procesa u OMD:

- 1. Unapređenje projektovanja alata i utvrđivanje parametara procesa, posredstvom:**
 - određivanja tečenja materijala i konačnih dimenzija dela;
 - uočavanja i prevencije defekata tečenja materijala;
 - simulacije procesa, u cilju provere popunjavanja alata;
 - kontrole uslova kontaktnog trenja i transfera toplote;
 - otkrivanja mesta prekomernih pritisaka u alatu, prevencije loma i povećanje veka alata.
- 2. Poboljšanje kvaliteta gotovog dela i smanjenje troškova proizvodnje, posredstvom:**
 - određivanja deformaciono-naponsko-temperaturnih polja u delu i alatu,
 - predviđanja mikrostrukture i kontrole veličine zrna;
 - smanjenja neuspelih pokušaja u proizvodnji, tipa „trial and error“;
 - smanjenja glavnog vremena izrade;
 - smanjenja škarta, poboljšanjem tečenja materijala.



MODELOVANJE PROCESA OBRADJE (DEFORMISANJA)

Nedovoljna zastupljenost u industriji!!! Zašto?

- nedovoljno iskazane potrebe za razvojem specijalizovanih korisničkih interfejsa - firme nemaju dovoljno interesovanja za akademske ustanove, to je „skupo i zametno, remeti tekući proces rada i načine rada“;
- rezultati dobijeni modeliranjem nisu prezentirani na način koji bi za krajnjeg korisnika bio interesantan i koristan (npr. model je razvijen za idealne, jednostavne geometrije i materijale, koji su daleko od složenosti i raznovrsnosti realnih procesa);
- sama fizika složenih procesa nije na zadovoljavajući način obrađena, obuhvatajući ceo opseg uslova pod kojima se izvodi, već je model veoma specifičan, za užu oblast primene, tako da je potencijalno tržište malo;
- zahtevi korisnika u pogledu hardvera, softvera i naučne ekspertize problema zavise od finansijskih sposobnosti industrije - naučni modeli „trpe“ opšte stanje u pogledu ekonomskih mogućnosti;
- ponuđeni modeli se nekada tretiraju kao potencijalni konkurenti kreativnim inženjerima, umesto kao jedan od alata za projektovanje u službi tih ljudi.



MODELOVANJE PROCESA OBRADJE (DEFORMISANJA)

Izbor modela i metodologije (metoda)

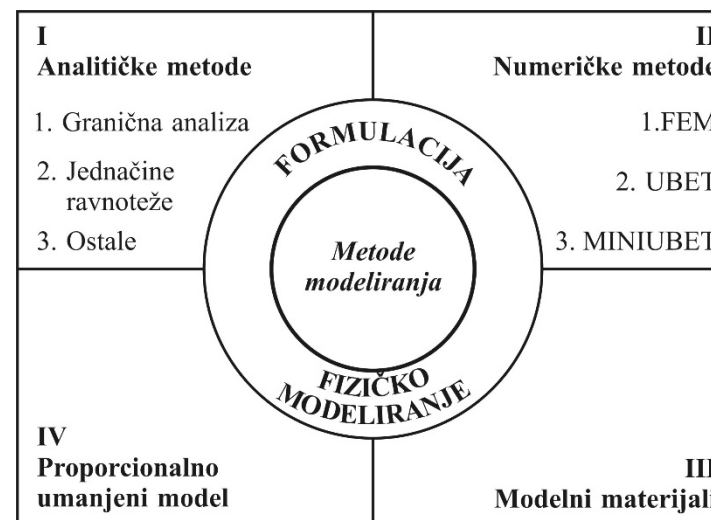
- kakva je fizika procesa i koje je područje problema?
- koja se metoda modeliranja primenjuje i da li je neophodna i koja softverska implementacija za rešavanje problema?
- koja je eksperimentalna podrška potrebna pri definisanju ulaznih podataka (određivanje graničnih uslova i karakteristika materijala)?
- koje su predviđene mogućnosti i sposobnosti razvijenog modela?

1. Matematičke metode

- ❖ Analitičke metode
- ❖ Numeričke metode
- ❖ Heurističke metode i metode veštačke inteligencije

2. Metode fizičkog modelovanja

- Proporcionalno umanjeni modeli
- Modelni materijali





MATEMATIČKO MODELOVANJE PROCESA DEFORMISANJA

Analitičke metode

- Metoda ravnih preseka (inženjerska metoda)
- Metoda linija klizanja
- Metoda vizioplastičnosti (teorija+exp.)
- Metoda gornje granice
- Varijaciona metoda
- Metoda deformacionog rada

Numeričke metode

- UBET
- MUBET
- MKE
- MKZ
- MKR
- Metoda reziduuma

Heurističke metode i metode veštačke inteligencije

- Ekspertni sistemi
- Soft computing
- Monte Carlo
- Genetski algoritam
- Evoluciono programiranje
- Neuronske mreže
- Fuzzy logic
- Simulirano kaljenje
- Tabu algoritam i dr.



MATEMATIČKO MODELOVANJE PROCESA DEFORMISANJA

Rešavanje matematičkih modela analitički se vrši primenom matematičke teorije, teorema, zakona i sl. Koristi se kada su u pitanju jednostavniji problemi, kao što su: algebarske i jednostavnije diferencijalne jednačine. Rešavanjem matematičkih modela analitički dobija se tačniji rezultat.

Rešavanje matematičkih modela numerički se vrši primenom numeričkih metoda i upotrebom programskih jezika (često upotrebom gotovih programskih paketa) i digitalnih računara. Koristi se za rešavanje složenijih jednačina. Tačnost rešavanja matematičkih modela numerički zavisi od preciznosti upotrebljene numeričke metode.

Tačnost matematičkih modela se najadekvatnije proverava poređenjem rezultata istraživanja dobijenih na modelu sa rezultatima dobijenim odgovarajućim eksperimentima. Tačnost modela se najčešće kvantifikuje pomoću srednje greške (apsolutne, relativne, razlike kvadrata, standardne devijacije itd.).

- Način validacije modela i interpretacije greške zavisi od ciljeva modela i načina rešavanja.
- Validnost modela zavisi i od utroška računarskog vremena i resursa



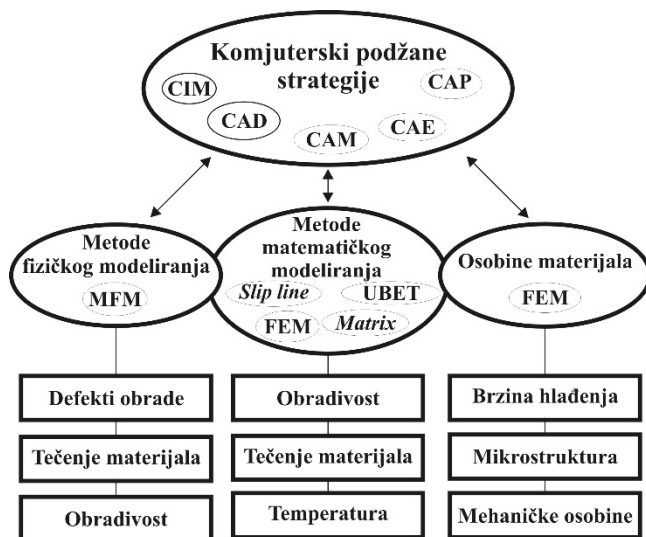
MATEMATIČKO MODELOVANJE PROCESA DEFORMISANJA

Uzroci grešaka matematičkih modela su:

- Pogrešne (nerealne) pretpostavke.
- Preveliko pojednostavljenje problema.
- Pogrešna matematička formulacija problema.
- Pogrešne vrednosti konstanti (ulaznih) podataka.
- Izbor neadekvatne numeričke metode.
- Pogrešan redosled postupaka u algoritmu.
- Velika tolerancija u numeričkoj metodi

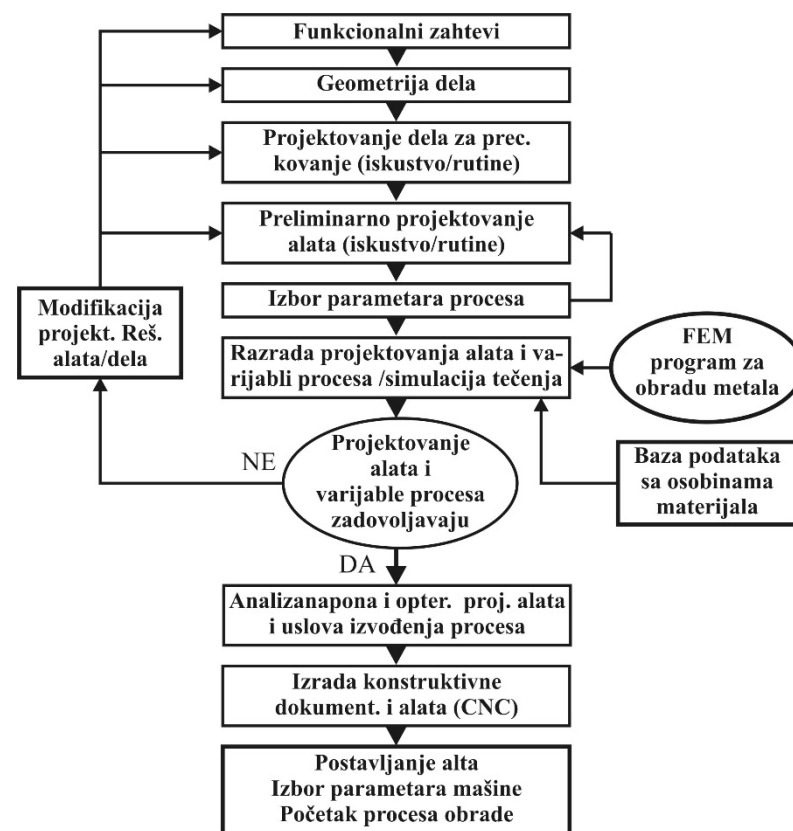


MODELOVANJE PROCESA OBRADJE (DEFORMISANJA)



Kriterijumi za optimizaciju:

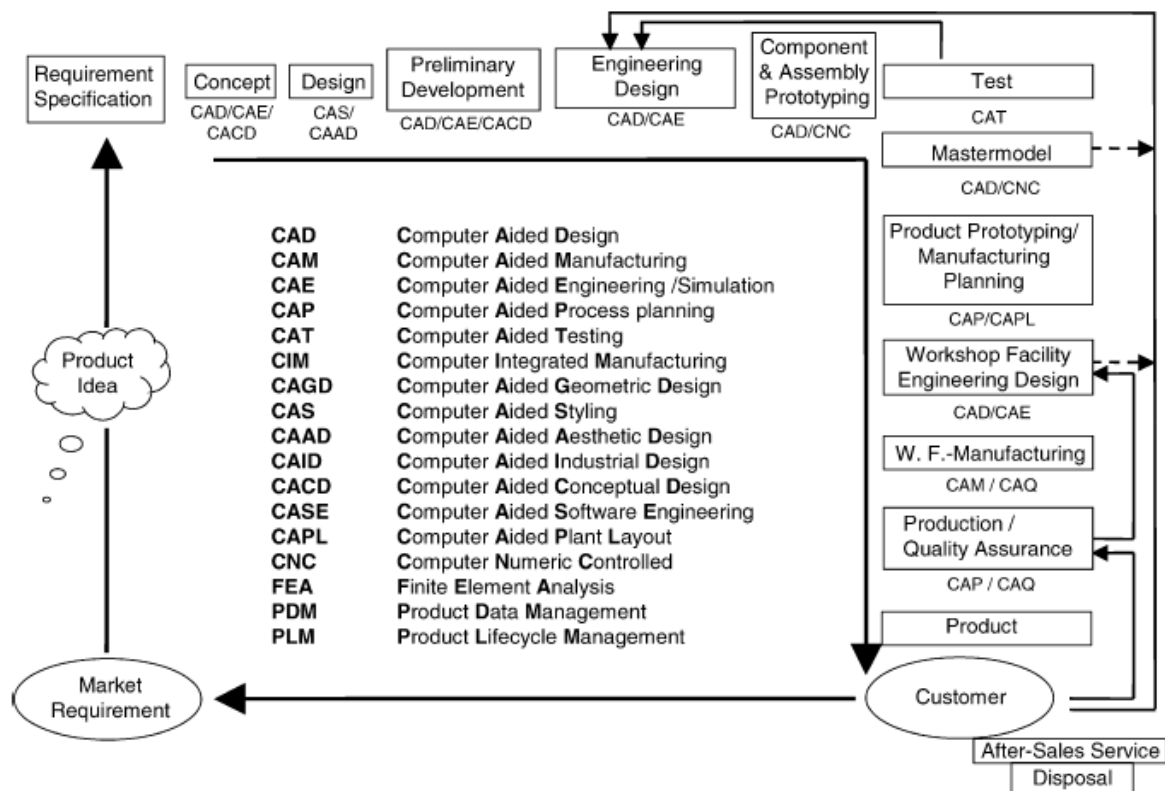
1. maksimalna dozvoljena deformaciona sila
2. maksimalna moguća deformacija
3. maksimalni dozvoljeni napon.





TEHNIKE VIRTUELNOG INŽENJERINGA - CAX TEHNOLOGIJE

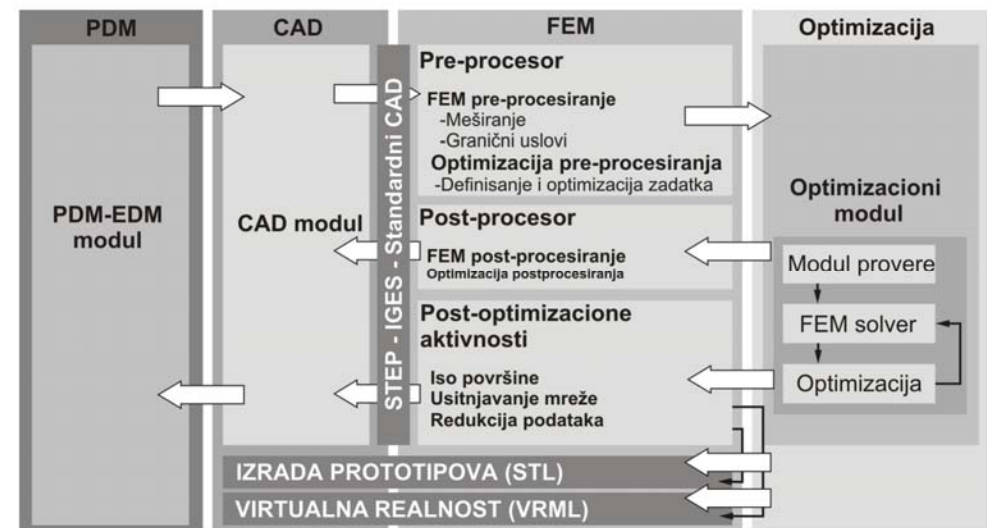
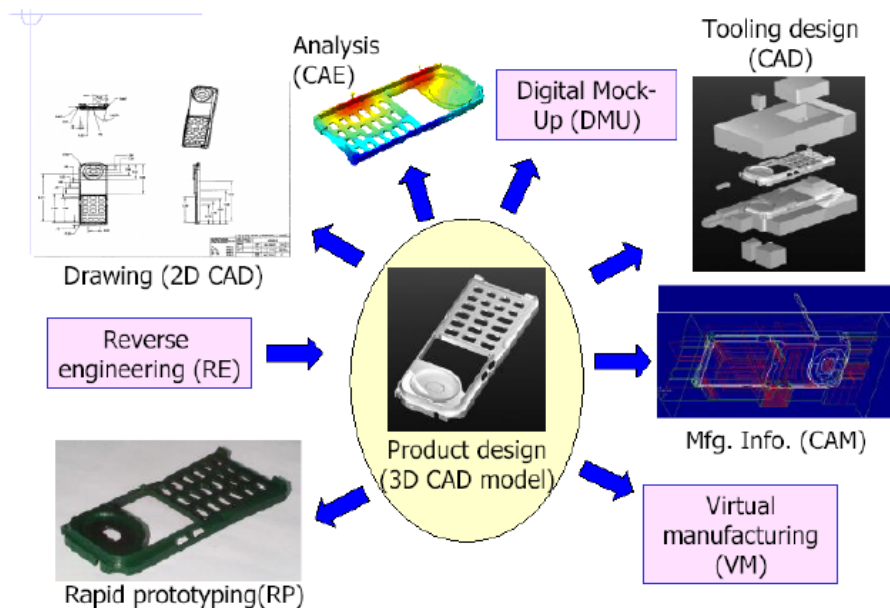
CAX-tehnologije (computer-aided technologies) je skup naprednih tehnika koje se koriste kao podrška u okviru multidisciplinarnog (integriranog) razvoja proizvoda (dizajn proizvoda i procesa, inženjerske analize, kontrola, montaža, upravljanje itd), a baziraju na primeni računara i odgovarajućih softverskih paketa.





Virtuelna proizvodnja – Virtual Manufacturing (VM)

Često okarakterisana kao “Sledeća revolucija u globalnoj proizvodnji”, pojam Virtuelna Proizvodnja podrazumeva skup aktivnosti u integrisanom razvoju i projektovanju proizvoda i procesa koje se realizuju u računarskom (virtuelnom) okruženju , sa ciljem da se proizvod i proces **modelira**, **simulira** i **optimizuje** (CAD/CAE/CAM/RE).





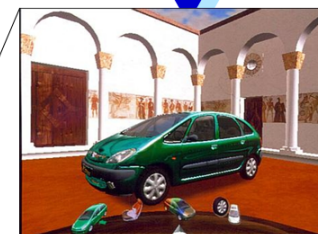
Virtual Reality – VR (3D vizuelizacija proizvoda, proizvodnje...)

VR - trodimenzionalno predstavljanje oblika, alata, radnog komada u realnom vremenu, u realnim uslovima, uz interakciju sa korisnikom (konstruktor, projektant, krajnji korisnik...) .



VR Marketing Applications

Citröen uses virtual showrooms





Virtual Reality – VR (3D vizuelizacija proizvoda)

Oblast primene VR

Razvoj proizvoda i procesa u avio i automobilskoj industriji, i to u:

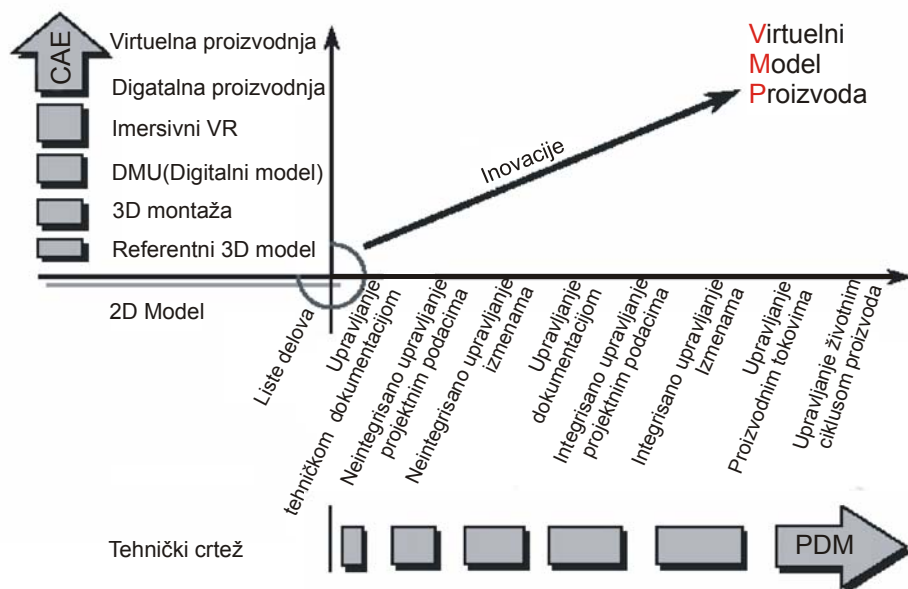
- proceni CAD podataka
- vizuelizaciji preliminarog projektnog
- rešenja
- analizi montaže i instaliranja
- ergonomskim ispitivanjima
- vizuelizaciji FEM modela
- procesa
- itd.

Figure 1: VirtualHand for VS-Design with the CyberGlove





Trendovi i benefiti CAE i VM



Manje prototipova alata

Pouzdanost
proizvodnog procesa

Ušteda u materijalu

Poboljšan kvalitet
proizvoda

Smanjeno vreme
plasmana proizvoda

Smanjenje troškova
izrada alata

Manji ukupni troškovi proizvodnje

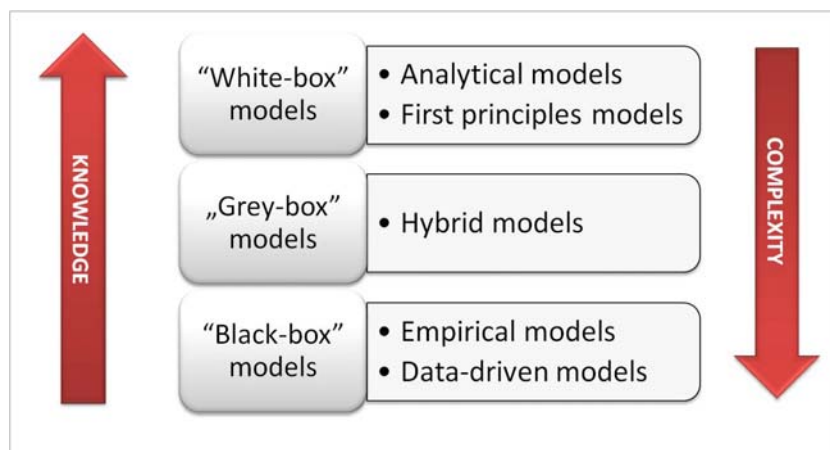
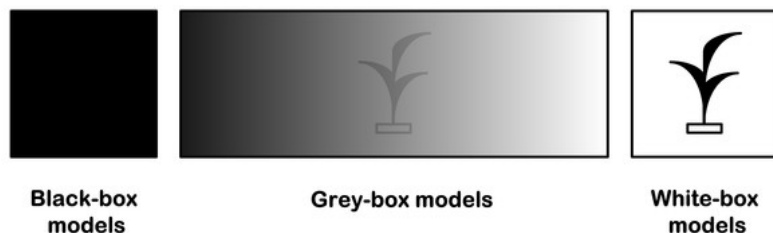




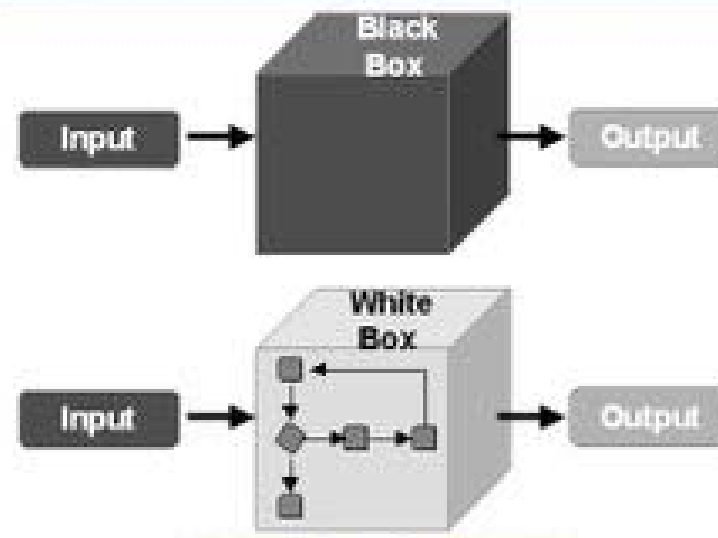
MATEMATIČKO MODELOVANJE CRNA-BELA KUTIJA

S obzirom na to koliko su poznati struktura, sastav i način funkcionisanja proučavanog realnog sistema, matematički modeli se dele na:

- ❖ modele crne kutije (Black box) (providni),
- ❖ modele bele kutije (White Box) (zatamnjeni) i
- ❖ modele sive kutije (Gray box)



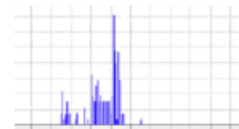
Comparison among Black-Box & White-Box Tests





Modelovanje tipa „crna kutija”

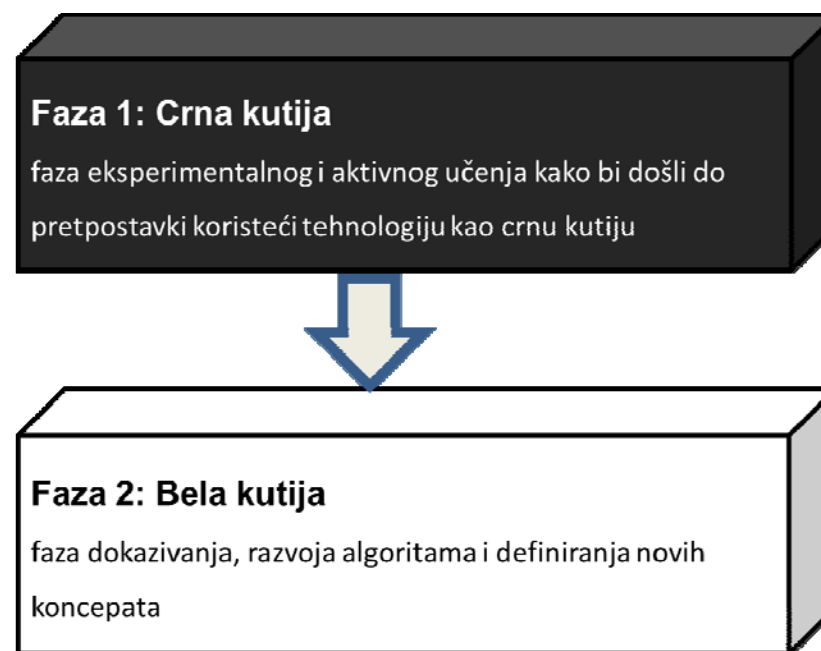
- Pod modelom **crne kutije** podrazumeva se model realnog sistema (pojava) koji se istražuje i koji se posmatra kao zatvorena kutija čija se strukturna građa (unutrašnje uređenje) ne poznaje. Drugim rečima, bez otvaranja kutije, praćenjem šta se dešava na ulazu i izlazu, težimo da saznamo šta se nalazi u zatvorenoj kutiji i kako se ona ponaša.
- Ponašanje modela se istražuje delovanjem na taj model i proučavanjem reakcija na ta delovanja.
- Modelovanje tipa crne kutije je pogodno za razmatranje dva tipična slučaja. Prvi, **kada se istražuju sistemi čija je unutrašnja struktura nepoznata**. Drugi slučaj se odnosi na proučavanje sistema čija je **unutrašnja struktura kompleksna**, da bi se na osnovu posmatranja ponašanja delova sistema mogli izvesti zaključci o ponašanju globalnog sistema.





Modelovanje tipa „crna kutija”

- Model crne kutije se npr. koristi prilikom konstruisanja novih proizvoda, pri tome se polazi od nepoznatog realnog sistema, crne kutije.
- Cilj istraživanja na modelu crne kutije jeste da se jasno i precizno definišu način funkcionisanja, zakonitosti ponašanja i strukturna građa tog realnog sistema, odnosno da se izvrši transformacija modela crne kutije (proučavanog realnog sistema) u model bele kutije.



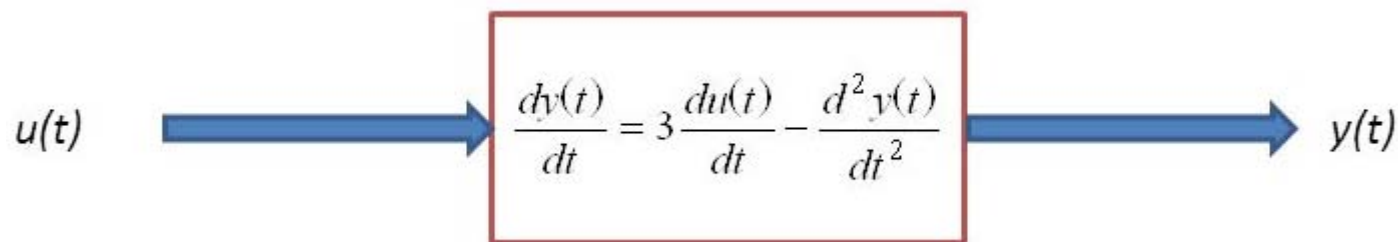


Modelovanje tipa „bele kutije”

- Analogno pojmu model crne kutije uveden je pojam model bele kutije, kod koga su poznati zakoni ponašanja i procesi u njemu kao dinamičkom sistemu.
- Način funkcionisanja proučavanog sistema je u potpunosti poznat, kompletno shvaćen i jasno prenesen na model bele kutije.
- U bilo kom modelu bele kutiji uvek ostaje nešto neobjašnjeno i nepoznato. Zbog toga se koristi model sive kutije.
- U praksi, većina realnih sistema se predstavlja modelom sive kutije.

Ovaj model daje fizički uvid u proces i objašnjava ponašanje procesa/sistema u smislu uticaja varijabli i mernih vrednosti.

Pošto detaljno objašnjavaju ponašanje procesa, ovi modeli su primenljivi za inženjersku analizu i optimizaciju i mogu se razviti za bilo koji sistem pre nego što se konstruiše.





EMPIRIJSKI PRISTUP U MODELOVANJU

- Zasnovan na **analizi eksperimentalnih rezultata**;
- Formiranje veze između izlazne i ulazne veličine, ili željene veličine i nezavisno promenjive / parametra. Veze između ulaznih i izlaznih veličina postavljaju se na osnovu rezultata merenja u eksperimentima.
- Oblik veze se definiše matematičkom funkcijom.
- Oblik matematičke funkcije - kompromis između toga koliko dobro se određene funkcije uklapaju u postojeće podatke i relativne jednostavnosti njihovih matematičkih oblika.
- U eksperimentima se najčešće variraju odabrani (značajni) parametri, a mere se željene veličine.
- Empirijski modeli su veoma korisni kada se donose neka predviđanja vezana za konkretan slučaj za koji je model razvijen.
- Empirijski model često nije (u potpunosti) zasnovan na teorijskoj analizi.
- Ranije se pristup koristio više, ali sa napretkom teorijskih istraživanja i brzim razvojem računara, se sve manje upotrebljava.
- Empirijskim modelima često nedostaje dovoljno opštosti, pa se ne mogu primeniti za neke druge situacije sa sličnom problematikom.



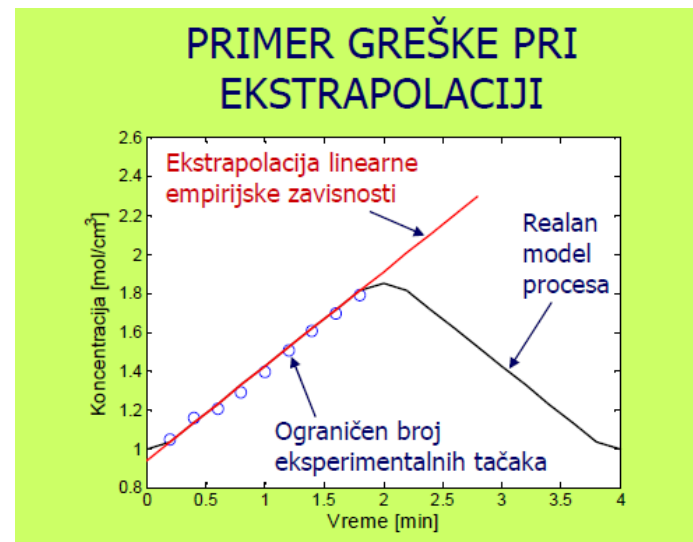
EMPIRIJSKI PRISTUP – PREDNOSTI

- Složeni sistemi (više faza, više komponenti i reakcija, više operacija, složena struktura) se često ne mogu opisati teorijski, ili se fundamentalni modeli ne mogu rešiti, pa empirijski pristup omogućava da se predvidi ponašanje tih sistema.
- Empirijski modeli se mogu koristiti sa relativno velikom pouzdanošću (mala greška predviđanja) ako se pretskazuje ponašanje istog ili sličnog sistema u opsegu vrednosti parametara za koje je predhodno izvršena analiza i razvoj modela.
- Najčešće su jednostavni za upotrebu / rešavanje.



EMPIRIJSKI PRISTUP – NEDOSTATCI

- Pošto empirijski modeli često nisu teorijski zasnovani, oni ne mogu da doprinesu boljem razumevanju fizičkih i hemijskih pojava u posmatranom sistemu (princip “crne kutije”).
- Postoji mogućnost da se neki od značajnih parametara ne uključe u analizu (kad nema teorijske zasnovanosti).
- Primena je ograničena samo na slične sisteme i na opseg parametara korišćen pri postavljanju modela – **Ekstrapolacija pri primeni empirijskog modela nije dozvoljena!**





EMPIRIJSKE (stohastičke) KORELACIJE

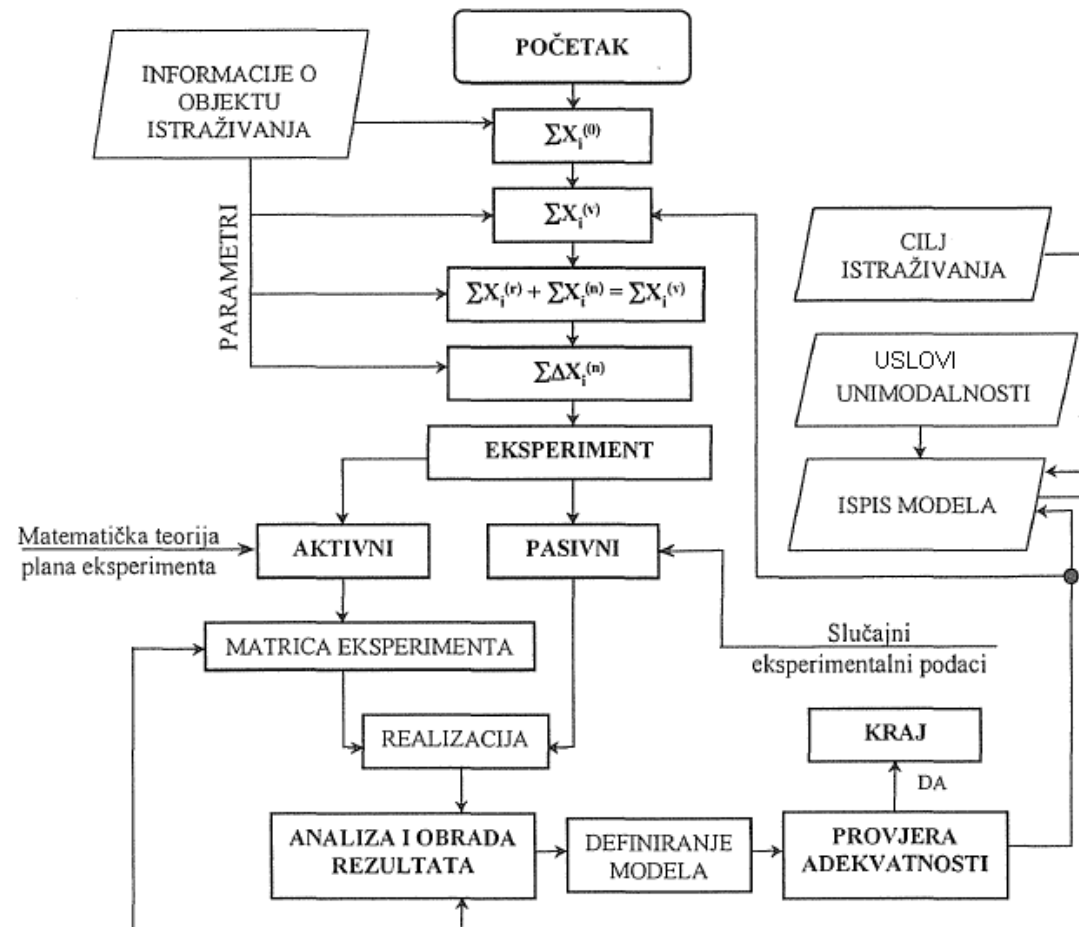
- Za predviđanje veličina (koeficijenata) pod različitim uslovima često se koriste empirijske korelacije
- Korelacije su najčešće bezdimenzione, oblika stepene funkcije:
na pr. $Y = K \cdot X_1^a \cdot X_2^b \cdot X_3^c$
- Izbor bezdimenzionih grupa se vrši na različite načine: teorijskom analizom, teorijom sličnosti, eksperimentalnom opservacijom i iskustvom,...
- Koeficijenti i stepeni u korelacijama se dobijaju na osnovu većeg broja eksperimentalnih rezultata

$$Sh = 0.023 \cdot Re^{0.83} Sc^{0.33}$$



ALGORITAM STOHAISTIČKOG MODELA

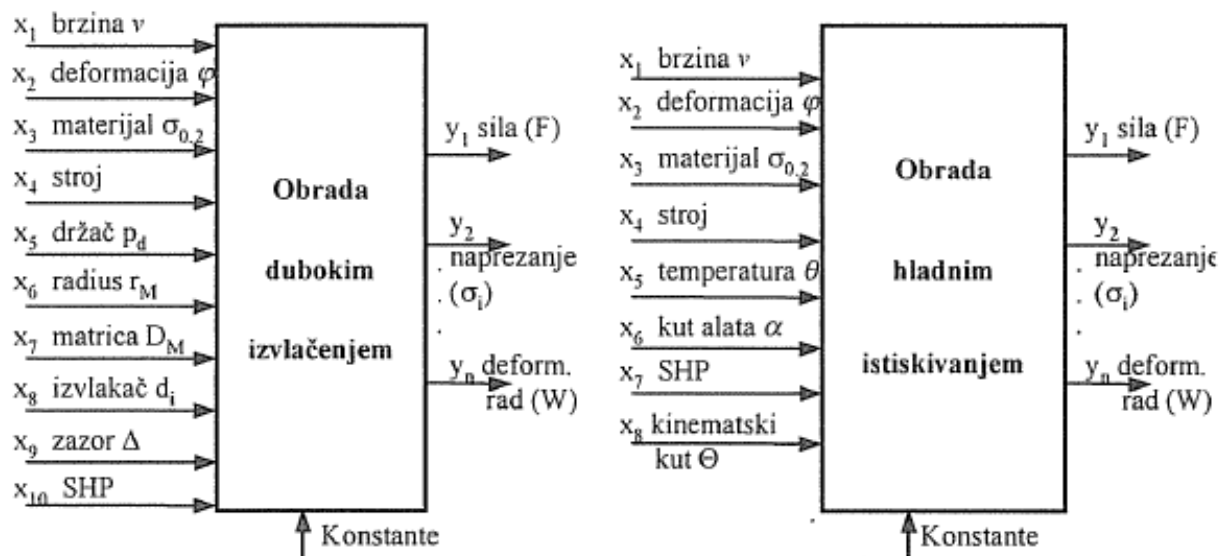
Razrada stohastičkog modela zasniva se na statističkoj obradi eksperimentalnih podataka





Izbor faktora, područje variranja i kodiranje

- Izbor uticajnih faktora procesa ili sistema izvodi se na osnovi prethodnog poznavanja istraživanog područja, literaturnih podataka o datom procesu i iskustva.
- Ponekad istraživač koristi samo literaturne podatke, tako da je modeliranje i sam eksperiment put u nedovoljno poznato područje.
- Kod izbora faktora obično se prvo nabroje svi uticajni faktori za koje se pretpostavlja da imaju uticaj na izlazne parametre procesa, a zatim se taj broj smanji na one koji imaju najveći uticaj. To su tzv. nezavisno promenljive veličine (x_1, x_2, \dots, x_k) iz kojih se dobiju izlazne - zavisno promenljive veličine (y_1, y_2, \dots, y_k).





Izbor faktora, područje variranja i kodiranje

Dvofaktorni matematički modeli

Ako je polinomski matematički model poznat i iskazan općim modelom:

$$R = C f_1^{\beta_1} f_2^{\beta_2},$$

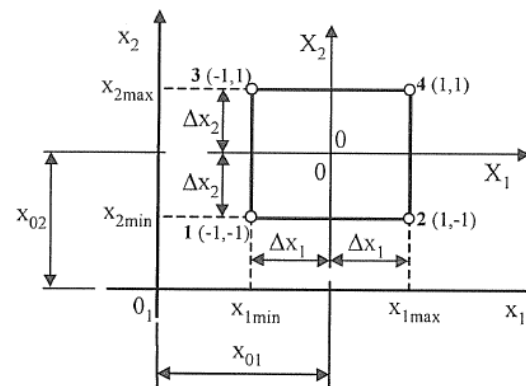
tada se logaritmiranjem dobije izraz:

$$\ln R = \ln C + \beta_1 \ln f_1 + \beta_2 \ln f_2,$$

gdje su: f_1, f_2 – nezavisno promjenljivi parametri,
 C, β_1, β_2 – nepoznati koeficijenti.

Ako se izvrši zamjena $y = \ln R$, $x_1 = \ln f_1$, $x_2 = \ln f_2$ i $\beta_0 = \ln C$ dobiva se polinom oblika:

$$y = \beta_0 x_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2.$$



Broj pokusa N = 2 ⁿ = 4	Fizikalne vrijednosti		Kodirane vrijednosti	
	x ₁ = σ ₁	x ₂ = φ	X ₁	X ₂
1	300	1,0	-1	-1
2	500	1,0	+1	-1
3	300	2,5	-1	+1
4	500	2,5	+1	+1

Broj pokusa N _j	Kodirane vrijednosti faktora				Vektor izlaza y _j
	X ₀	X ₁	X ₂	X ₁ X ₂	
1	+1	-1	-1	+1	y ₁
2	+1	+1	-1	-1	y ₂
3	+1	-1	+1	-1	y ₃
4	+1	+1	+1	+1	y ₄

Koeficijenti	b ₀	b ₁	b ₂	b ₁₂
	Matematički model			
	$y = b_0 x_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2$			
	$y = b_0 x_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2$			

Izračunavanje koeficijenata modela

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X_{0j} \bar{Y}_j = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \bar{Y}_j,$$

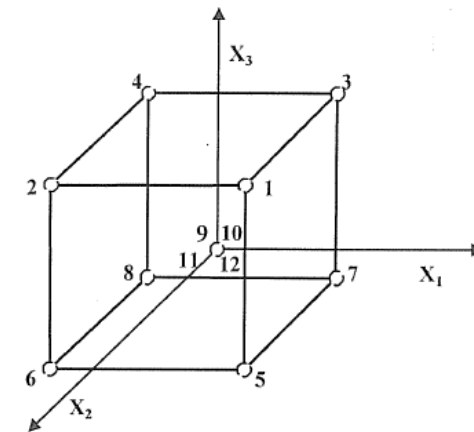
$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X_{ij} \bar{Y}_j, \quad \text{za } i = 1, 2,$$

$$b_{12} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X_{ij} X_{mj} \bar{Y}_j, \quad \text{za } 1 \leq i < m \leq k = 2$$



Trofaktorni matematički modeli

Broj pokusa N_j	Kodirane vrijednosti faktora – matrica plana								Vektor izlaza y_j
	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	$X_1X_2X_3$	
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	y_1
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	y_2
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	y_3
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	y_4
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	y_5
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	y_6
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	y_7
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	y_8
Koeficijenti višestruke regresije	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{123}	
Matematički model	$y = b_0x_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3$								
	$y = b_0x_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3$								



Izračunavanje koeficijenata modela

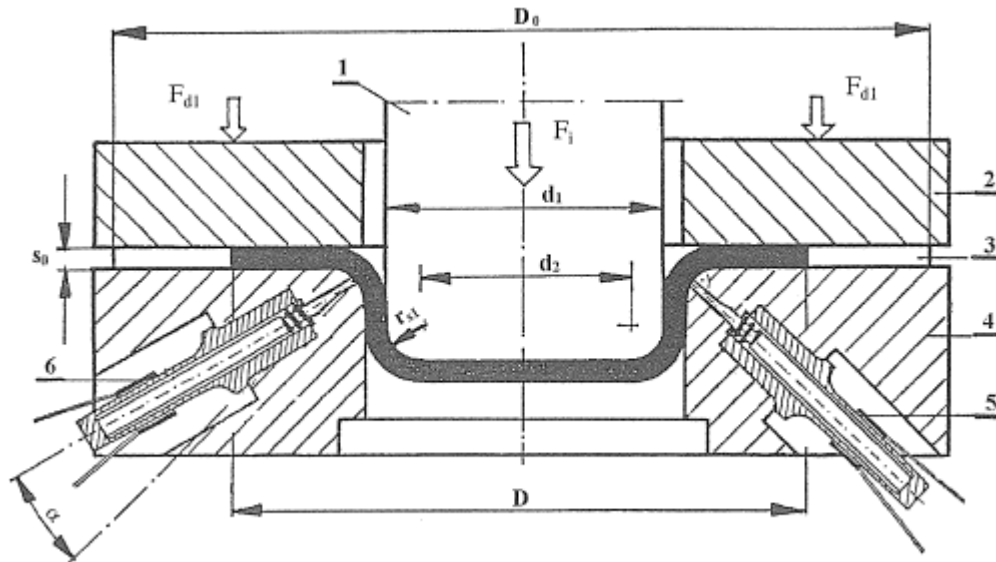
$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X_{0j} y_j = \frac{1}{N} \left(\sum_{j=1}^{N-n_0} X_{0j} y_j + \sum_{j=n_0+1}^N X_{0j} y_j \right),$$

$$b_i = \frac{1}{N - n_0} \sum_{j=1}^N X_{ij} y_j, \quad \text{za } i = 1, 2, \dots, k,$$

$$b_{im} = \frac{1}{N - n_0} \sum_{j=1}^N X_{ij} X_{mj} y_j, \quad \text{za } 1 \leq i < m \leq k,$$

gdje su: n_0 – broj ponovljenih pokusa u centralnoj točki plana,
 $N = 2^k + n_0$ – ukupan broj pokusa,
 y_{0j} – rezultati pokusa u centralnoj točki plana,
 y_j – rezultati pokusa u N točaka plana ili u $N - n_0$ točaka plana.

Modelovanje sile procesa dubokog izvlačenja



Konstantni parametri procesa izvlačenja:

- *materijal priprema Č 0148,*
- *pritisak držača lima $p = 1,50 \text{ N/mm}^2$,*
- *debljina lima priprema $s_0 = 0,80 \text{ mm}$,*
- *unutrašnji prečnik dela $d_1 = 18,0 \text{ mm}$,*
- *radijus zaobljenja žiga $r_z = 2,0 \text{ mm}$,*
- *brzina žiga $v = 100 \text{ mm/min}$.*

Radne površine alata su brušene i polirane, zazori u alatu su jednaki za sve eksperimente.

Prečnik pripreмка:

$D01 = 28,0 \text{ mm}$, $D02 = 31,0 \text{ mm}$, $D03 = 34,5 \text{ mm}$

Sila izvlačenja F_i

- *tribološki uslovi (sredstvo za podmazivanje - koeficijent kontaktnog trenja μ),*
- *geometrija matrice (radijus zaobljenja r_m),*
- *stepen deformacije $\varphi = \ln(D_0/d_1)$.*

$$F = f(\mu, \varphi, r_m)$$

Utjecajni parametri		Kodirane i fizikalne vrijednosti ulaznih parametara		
Kodirani parametri	X_i	- 1	0	1
Fizikalni parametri	$x_1 = \mu$	0,04	0,08	0,12
	$x_2 = r_M$	2,00	2,50	3,00
	$x_3 = \varphi$	0,40	0,50	0,60



Modelovanje sile procesa dubokog izvlačenja

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{23}X_2X_3 + b_{13}X_1X_3 + b_{123}X_1X_2X_3.$$

Red. br. pokusa N_j	Fizikalne varijable procesa			Kodirane varijable procesa			Numerički rezultati sile izvlačenja	
	μ	r_M	φ	X_1	X_2	X_3	Eksperimentalne vrijednosti $Y_j = F_j$	Izračunate vrijednosti $Y_j^R = F_j^R$ prema modelu (4.108)
	--	mm	--				daN	
1	0,04	2,00	0,40	-1	-1	-1	950	981,8
2	0,12	2,00	0,40	1	-1	-1	1120	1141,8
3	0,04	3,00	0,40	-1	1	-1	870	886,8
4	0,12	3,00	0,40	1	1	-1	1000	1046,8
5	0,04	2,00	0,60	-1	-1	1	1100	1141,8
6	0,12	2,00	0,60	1	-1	1	1280	1301,8
7	0,04	3,00	0,60	-1	1	1	1020	1046,8
8	0,12	3,00	0,60	1	1	1	1180	1206,8
9	0,08	2,50	0,50	0	0	0	1120	1094,3
10	0,08	2,50	0,50	0	0	0	1150	1094,3
11	0,08	2,50	0,50	0	0	0	1130	1094,3
12	0,08	2,50	0,50	0	0	0	1160	1094,3
13	0,08	2,50	0,50	0	0	0	1100	1094,3
14	0,08	2,50	0,50	0	0	0	1140	1094,3



Modelovanje sile procesa dubokog izvlačenja

Koeficijenti b_i b_{ij}	Stupanj slobode f_i	Zbir kvadrata S_{bi}^2	Izračunati odnos, F-test $F_{ri} = \frac{S_{bi}^2}{S_0^2}$	Tablična vrijednost $F_i(f_1, f_2) = F_i(1, 5)$	Verifikacija
$b_0 = 1094,29$	$f_0 = 1$	$S_{b0}^2 = N \cdot b_0^2 = 16764894,9$	$F_{r0} = 35922,2$	6,61	*
$b_1 = 80,0$	$f_1 = 1$	$S_{b1}^2 = (N - n_0) b_1^2 = 51200$	$F_{r1} = 109,7$	6,61	*
$b_2 = -47,5$	$f_2 = 1$	$S_{b2}^2 = (N - n_0) b_2^2 = 18050$	$F_{r2} = 38,7$	6,61	*
$b_3 = 80,0$	$f_3 = 1$	$S_{b3}^2 = (N - n_0) b_3^2 = 51200$	$F_{r3} = 109,7$	6,61	*
$b_{12} = -7,5$	$f_{12} = 1$	$S_{b12}^2 = (N - n_0) b_{12}^2 = 450$	$F_{r12} = 0,964$	6,61	
$b_{13} = 5,0$	$f_{13} = 1$	$S_{b13}^2 = (N - n_0) b_{13}^2 = 200$	$F_{r13} = 0,428$	6,61	
$b_{23} = 2,5$	$f_{23} = 1$	$S_{b23}^2 = (N - n_0) b_{23}^2 = 50$	$F_{r23} = 0,107$	6,61	
$b_{123} = 2,5$	$f_{123} = 1$	$S_{b123}^2 = (N - n_0) b_{123}^2 = 50$	$F_{r123} = 0,107$	6,61	

* značajni koeficijenti matematičkog modela

Ispitivanje signifikantnosti koeficijenata matematičkog modela – Fisher-ov test

$$F_{ri} = \frac{S_{bi}^2}{S_0^2} \geq F_{i(f_{bi}, f_2)} = F_{i(1, f_0)}, \quad \text{za } i = 0, 1, 2, \dots, k$$

$$S_{b0}^2 = \frac{N b_0^2}{f_{b0}}, \quad S_{bi}^2 = \frac{(N - n_0) b_i^2}{f_{bi}}, \quad \text{za } i = 0, 1, 2, \dots, k$$

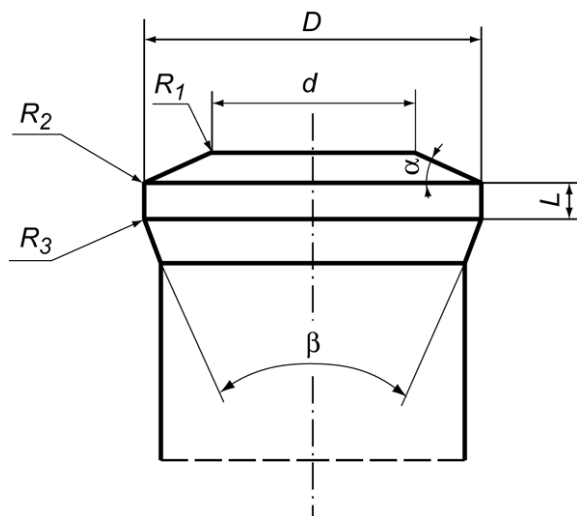
$$S_0^2 = \frac{\sum_{j=1}^{n_0} (y_{0j} - \bar{y}_0)^2}{f_0}$$

$$S_0^2 = \frac{\sum_{j=1}^{n_0} (y_{0j} - \bar{y}_0)^2}{n_0 - 1} = \frac{2333,4}{5} = 466,7; \quad \bar{y}_0 = \frac{\sum_{j=1}^{n_0} y_{0j}}{n_0} = \frac{6800}{6} = 1133,3.$$

$$Y = F_i = 1094,29 + 80 X_1 - 47,5 X_2 + 80 X_3. \quad (4.108)$$



Modelovanje habanja žigau proceu istiskivanja



	α°	d [mm]	L [mm]
1.	3	1.375	0.1
2.	42	1.375	0.1
3.	3	8.720	0.1
4.	42	8.720	0.1
5.	3	1.375	1.9
6.	42	1.375	1.9
7.	3	8.720	1.9
8.	42	8.720	1.9
9.	3	3.462	1.435

$$N = C \cdot \alpha^{C_1} \cdot d^{C_1} \cdot L^{C_1}$$

α , d, D – analizirani faktori

C, C_1 , C_2 , C_3 – konstante

N – broj izradaka dobijen matematičkim modelom

Kontrolisan svaki **500-ti** uzorak.

Žig je smatrao ishabanim kad je **$\Delta D = 0,06\text{mm}$** .

$$N = 39815 \cdot \alpha^{1.16} \cdot d^{-0.38} \cdot L^{0.159} e^{(-0.062 \cdot \ln \alpha \cdot \ln d + 0.219 \cdot \ln \alpha \cdot \ln L + 0.09 \cdot \ln d \cdot \ln L)}$$