

# Proračun NS

## *Proračun NS primenom MKE*

*Proračun struktura primenom kompjutera predstavlja kompleksan postupak koji zahteva **poznavanje "klasičnog"** proračuna uz primenu novih metoda i tehnika proračuna.*

*Primenom kompjutera inženjerske aktivnosti su na višem tehnološkom nivou.*

*Kompjuterski proračun omogućava **kompleksnu identifikaciju** ponašanja konstrukcije.*

*Ostaje činjenica da je **čovjek** najvažniji faktor procesa projektovanja i proračuna (defmiše tehnička **ograničenja, opterećenja** konstrukcije, **granične uslove**, ...), jer njegovu kreativnost i intuiciju ne može da zameni ni jedan kompjuter, programski paket, ..., već mu on samo omogućava da postane daleko **efikasniji** (pružajući **sveobuhvatniji "ULAZ"** za identifikaciju ponašanja NS)*

# Proračun NS primenom MKE

*Razvijene metode i tehnike standardne (univerzalne) analize i proračuna NS odnose se i na primenu MKE.*

*MKE predstavlja savremenu numeričku metodu koja **diskretizacijom strukture** na veći broj konačnih elemenata (linijski, površinski, zapreminski) pravilnog geometrijskog oblika, čije se ponašanje relativno jednostavno opisuje, omogućava **modeliranje i proračun** kompleksnih konstrukcija i problema. **MKE** (kroz brojne programske pakete) je **postala standard** u analizi i optimizaciji ponašanja NS.*

***Primena MKE** pri proračunu NS (a i šire pri analizi parametara čvrstoće bilo kog sklopa ili elementa), **podrazumeva razvijen metodološki** prilaz analizi ponašanja razmatrane strukture.*

*Potrebno je naznačiti **osnovne postavke MKE.***

# Teorijske osnove MKE

*MKE je savremena numerička metoda koja **diskretizacijom** strukture **na veći broj konačnih elemenata** (linijski, površinski, zapreminski) **pravilnog** geometrijskog oblika, čije se ponašanje relativno **jednostavno** opisuje **primenom matričnog računa**, omogućava identifikaciju ponašanja razmatrane strukture.*

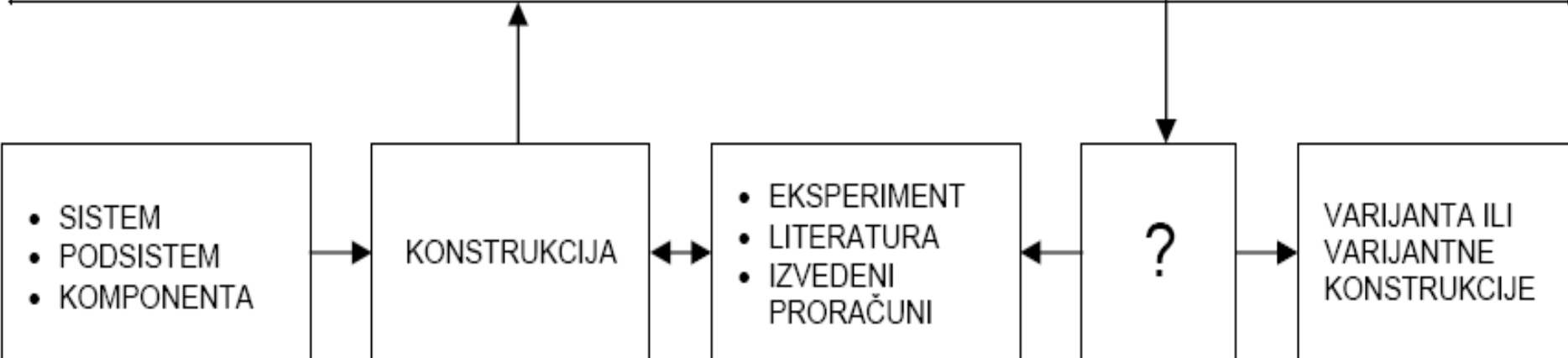
*MKE je našla primenu **u skoro svim** oblastima tehnike za **statički, dinamički i termički; linearan i nelinearan; stacionaran i nestacionaran proračun.***

*Izuzetne pogodnosti i prednosti su omogućile da se danas MKE razvije **u posebnu naučnu oblast.***

# Teorijske osnove MKE

## *Segmenti u primeni MKE*

MODELIRANJE	PREPROCESOR	PROCESOR	POSTPROCESOR
<ul style="list-style-type: none"><li>• Preslikavanje</li><li>• Definisanje problema</li><li>• Izbor konačnih elemenata</li><li>• Diskretizacija</li><li>• Granični uslovi i opterećenja</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Lokalno generisanje</li><li>• Globalno generisanje</li><li>• Grafika</li><li>• Optimizacija povezivanja čvorova</li><li>• Konverzije: Acad i Hpgl</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Statički</li><li>• Dinamički</li><li>• Termički</li><li>• Linearan i nelinearan</li><li>• Stacionaran i nestacionaran</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Analize rezultata</li><li>• Specifični proračuni</li><li>• Grafika</li><li>• Elementi optimizacije</li><li>• Konverzije: Acad i Hpgl</li></ul>
1D, 2D, 3D PROBLEMI			



# Teorijske osnove MKE

***Značajan i zahtevan segment primene MKE predstavlja modeliranje, odnosno diskretizacija realnih struktura u cilju definisanja proračunskih modela.***

***Do konačno diskretizovanog modela dolazi se kroz fazu preprocesora u kojoj korisnik odgovarajućeg programskog paketa puno vremena provodi uz računar, definišući veliki broj ulaznih podataka vezanih za:***

***Generisanje koordinata čvornih tačaka,***

***Konačnih elemenata,***

***Opterećenja,***

***Graničnih uslova,***

***i dr.***

***(Automatsko generisanje mreže iz oblika?!?!?)***

# Teorijske osnove MKE

## *Faza procesiranja*

*Ova faza, primenom MKE definiše mehaniku deformabilnih tela, na osnovu koje se sagledava ponašanje strukture i procenjuje njeno reagovanje na radna opterećenja.*

*Adekvatna identifikacija ponašanja strukture je pretpostavka optimizacije funkcionalnih i parametara čvrstoće i pouzdanosti analizirane konstrukcije.*

*Osnovna statička jednačina u matričnom obliku i globalnom koordinatnom sistemu glasi:*

$$[K][\delta] = [F]$$

# Teorijske osnove MKE

## Osnovna statička jednačina u matičnom obliku

$[K] = \sum_{(k)=1}^m [k_{rs}]_{(k)}$  - globalna (ukupna) matrica krutosti

$[\delta] = [\delta_1 \delta_2 \delta_3 \dots \delta_r \dots \delta_n]^T$  - globalna matrica vektora nepoznatih pomeranja,

$[F] = [F_1 F_2 F_3 \dots F_r \dots F_n]^T$  - globalna matrica vektora opterećenja,

$\delta_r, F_r$  - vektor pomeranja i opterećenja čvora  $r$  (translacije i rotacije),  
 $r, s = 1, 2, 3 \dots n$

$n, m$  - ukupan broj tačaka i elemenata modela,

$[k_{rs}]_{(k)} = [T]^T [\bar{k}_{rs}] [T]$  - matrica krutosti KE u globalnom sistemu,

$[T]$  - matrica transformacije lokalnog i globalnog sistema,

$[\bar{k}_{rs}] = \iiint_V [B]^T [D] [B] dV$  - matrica krutosti KE u lokalnom sistemu,

$[D]$  - matrica elastičnosti materijala,

$[B] = [L][N]$  - matrica veza deformacije i pomeranja,

$[L], [N]$  - matrica diferencijalnih operatora problema i funkcije oblika KE,

$[\sigma] = [D][\varepsilon]_{(k)} = [D][B][\delta]_{(k)}$  - matrica vektor napona,

$[\varepsilon]_{(k)}$  - matrica vektor deformacije KE.

$$[K][\delta] = [F]$$

# Teorijske osnove MKE

***Osnovna dinamička jednačina  
prinudnih prigušenih oscilacija glasi:***

$$[M][\ddot{\delta}] + [B][\dot{\delta}] + [K][\delta] = [F(t, \omega)]$$

$[M], [B], [K]$  - matrica masa, prigušenja i krutosti,

$[\ddot{\delta}], [\dot{\delta}], [\delta]$  - matrica vektora ubrzanja, brzine i pomeranja,

$[F(t, \omega)]$  - prinudni vektor sila u vremenskom ili frekventnom domenu,

$\omega_r, [\mu_r]$  -  $r$ -ta sopstvena frekvencija i  $r$ -ta matirica vektor.

# Teorijske osnove MKE

## *Postprocesor*

*Osnovne - najprostije funkcije postprocesora, koji predstavlja **pomoć pri obradi rezultata** proračuna, podrazumevaju minimiziranje ručne obrade rezultata proračuna, primenom kondenzovane štampe, analize jednog i više modela za jedno i više opterećenja.*

*Medjutim, posebno treba istaći **značaj specifičnih proračuna**, koji omogućava bliže upoznavanje ponašanja konstrukcije.*

*Efikasna identifikacija ponašanja NS i **usmeren** redizajn u cilju optimizacije NS (raspodela **membranskih** i savojnih napona, **energija** deformacije i kinetičkih i potencijalnih energija po strukturi) predstavljaju funkcije postprocesora koje, dakle, **pomažu** pri definisanju potrebnih modifikacija na NS (u cilju **optimizacije**). Raspodela svih elemenata optimizacije se izražava u procentima i po izabranoj grupi KE.*





# Teorijske osnove MKE

*Osnovna ideja MKE je iznalaženje rešenja komplikovanog problema, aproksimativnim (približnim) numeričkim metodama.*

*Kontinualna (neprekidna) struktura se idealizuje podelom (diskretizacijom) sa malim elementima pravilnog geometrijskog oblika koje nazivamo konačnim elementima.*

***Zajednička tačka** susednih elemenata se naziva "**čvor**", odnosno čvorna tačka. Ona ima osobinu da je **pomeranje svih susednih elemenata u tom čvoru isto**, odnosno ponašanje tog dela strukture je opisano preko zajedničkog čvora. Ponašanje cele strukture, se tako, opisuje preko čvornih tačaka modela dobijenih diskretizacijom.*

***Polje pomeranja** čvorova dobijamo iz matrične jednačine ravnoteže.*

*Na osnovu polja pomeranja određuje se **deformacija i napon** konačnih elemenata, kao i tačaka strukture.*

# Teorijske osnove MKE

**Metoda konačnih elemenata opisana procedurom korak-po-korak u statičkoj analizi glasi:**

**korak 1 :**

**Modeliranje, idealizacija i diskretizacija** strukture. Izbor tipa, broja, veličine i raspodela elemenata predstavljaju najvažnije funkcije modeliranja problema,

**korak 2 :**

Izbor pravog interpolacionog modela za polje pomeranja. Modeli se uglavnom daju u formi polinoma. Oni treba da obezbede pretpostavljeni model pomeranja, deformacije i napona konačnog elementa.

**korak 3 :**

Formiranje **matrica krutosti i vektora opterećenja** konačnih elemenata. Sve veličine konačnog elementa se izračunavaju u koordinatnom sistemu elementa (**lokalni**) i koordinatnom sistemu strukture (**globalni**).

# Teorijske osnove MKE

***Metoda konačnih elemenata opisana procedurom korak-po-korak u statičkoj analizi glasi:***

***korak 4 :***

***Sastavljanje ukupne (globalne) matrice krutosti, vektora opterećenja i graničnih uslova strukture. Svaka matrica krutosti i vektor opterećenja konačnog elementa dodaje se na mestima definisanim globalnim rednim brojem čvorova elementa, kao i granični (konturni) uslovi.***

***korak 5 :***

***Rešavanje nepoznatih pomeranja čvorova iz jednačina statičke ravnoteže (sistem linearnih algebarskih jednačina).***

***korak 6 :***

***Izračunavanje deformacije i napona konačnih elemenata.***

***korak 7 :***

***Izračunavanje napona tačaka strukture***

# Proračun NS primenom MKE

## *Metodološki prilaz proračuna NS primenom MKE*

*Već je naznačeno da primena MKE podrazumeva odgovarajući metodološki prilaz analizi ponašanja razmatrane strukture. Oni tretiraju problematiku proračuna i optimizacije NS vozila bazirajući se na intenzivnom uključenju MKE.*

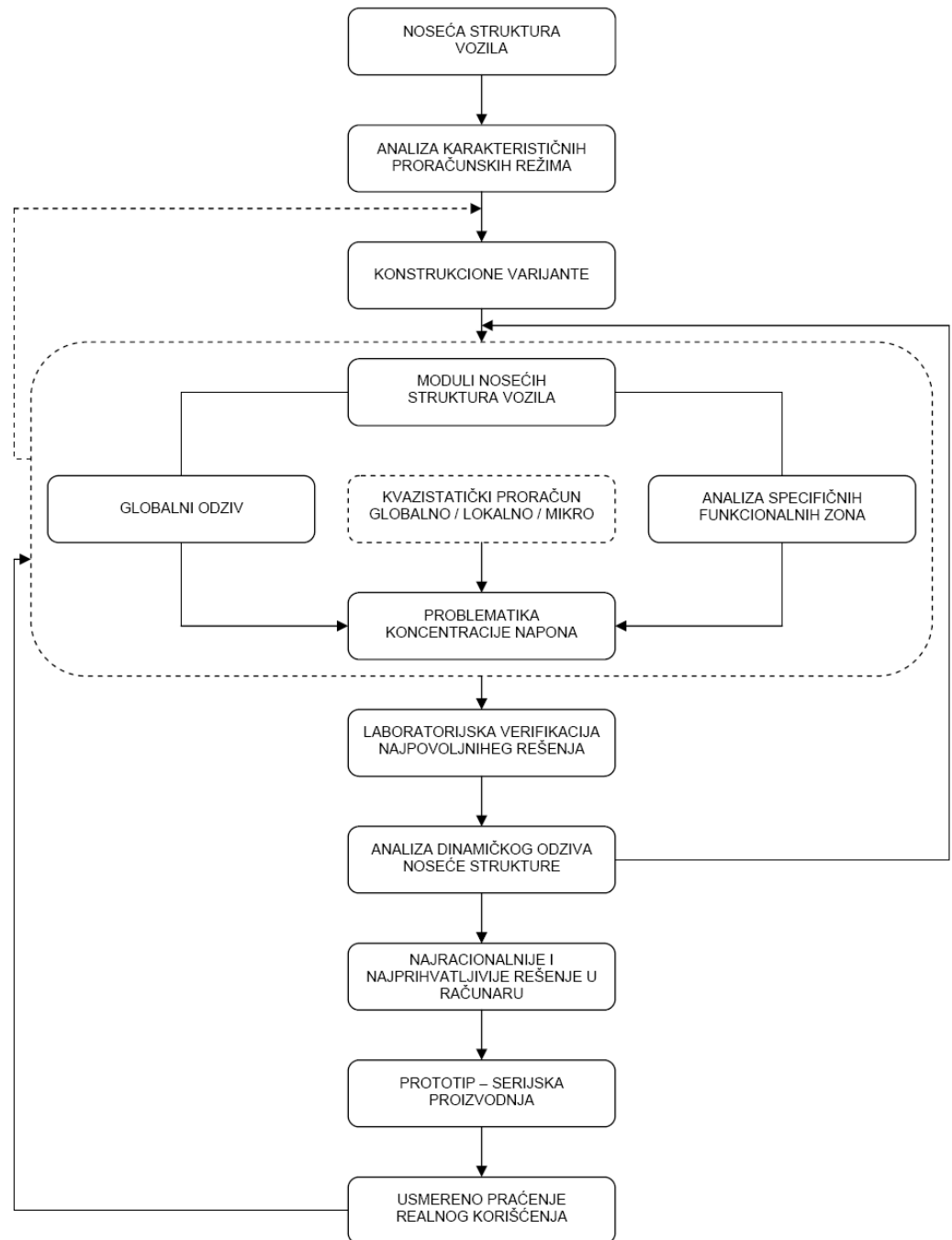
*Metodološki prilaz pokriva sve faze identifikacije u smislu optimizacije konstrukcije. Očigledno je da se **konačne odluke** donose uključenjem **više metoda** identifikacije ponašanja strukture. Pri tome se uvek teži **minimiziranju obima** ispitivanja (laboratorijskog, a pogotovo eksploatacijskog), mada je **verifikacija i validacija** proračunskih diskretizovanih modela **neophodna**.*

# Proračun NS primenom MKE

Metodološki prilaz

**MP**

*proračuna NS  
primenom MKE*



# Proračun NS primenom MKE

Osnovne karakteristike MP identifikacije ponašanja NS su:

*Simultaneous Engineering (SE), u smislu paralelnosti odvijanja aktivnosti, kao pretpostavka neprekidnosti razvojnih aktivnosti, koja se danas podrazumeva (uslovno „princip većitog prototipa“)*

*Modularnost koja podrazumeva zasebno razmatranje pojedinih specifičnih funkcionalnih zona (SFZ). Osnovni noseći modul je baza celokupne noseće strukture (NS) i iziskuje posebnu pažnju. Međutim, neophodnost celovitog prilaza identifikacije ponašanja NS nameće potrebu da se, u zasebnim analizama, detaljnije razmatraju ponašanja pojedinih funkcionalnih celina NS (zone VEZE sistema za oslanjanje, zone vučnog čepa, ZONE zaštitnih uređaja od podletanja sa zadnje i bočne strane, ZONA vetrobranskog stakla autobusa, oslonih jastuka samonosećih cisterni i dr.).*

# Proračun NS primenom MKE

## Osnovne karakteristike MP

*Hijerarhijska analiza (**globalno**, lokalno-fino, **mikro** zona, submikro,... koliko već treba) zavisi od potreba za detaljnim sagledavanjem ponašanja određene IZ. Posebno treba istaći **sledljivost** i preslikavanje graničnih uslova u ovakvim analizama.*

*Neprekidnost koja bazira na činjenici da je **uvek** moguće realizovati **bolje** konstrukcijsko rešenje noseće strukture.*

*Stvar je rukovodstva razvojnog tima da usmeri razvojne aktivnosti, odnosno njihove prioritete, saglasno utvrdjenim opštim strategijama razvoja.*

# Proračun NS primenom MKE

## Osnovne karakteristike MP

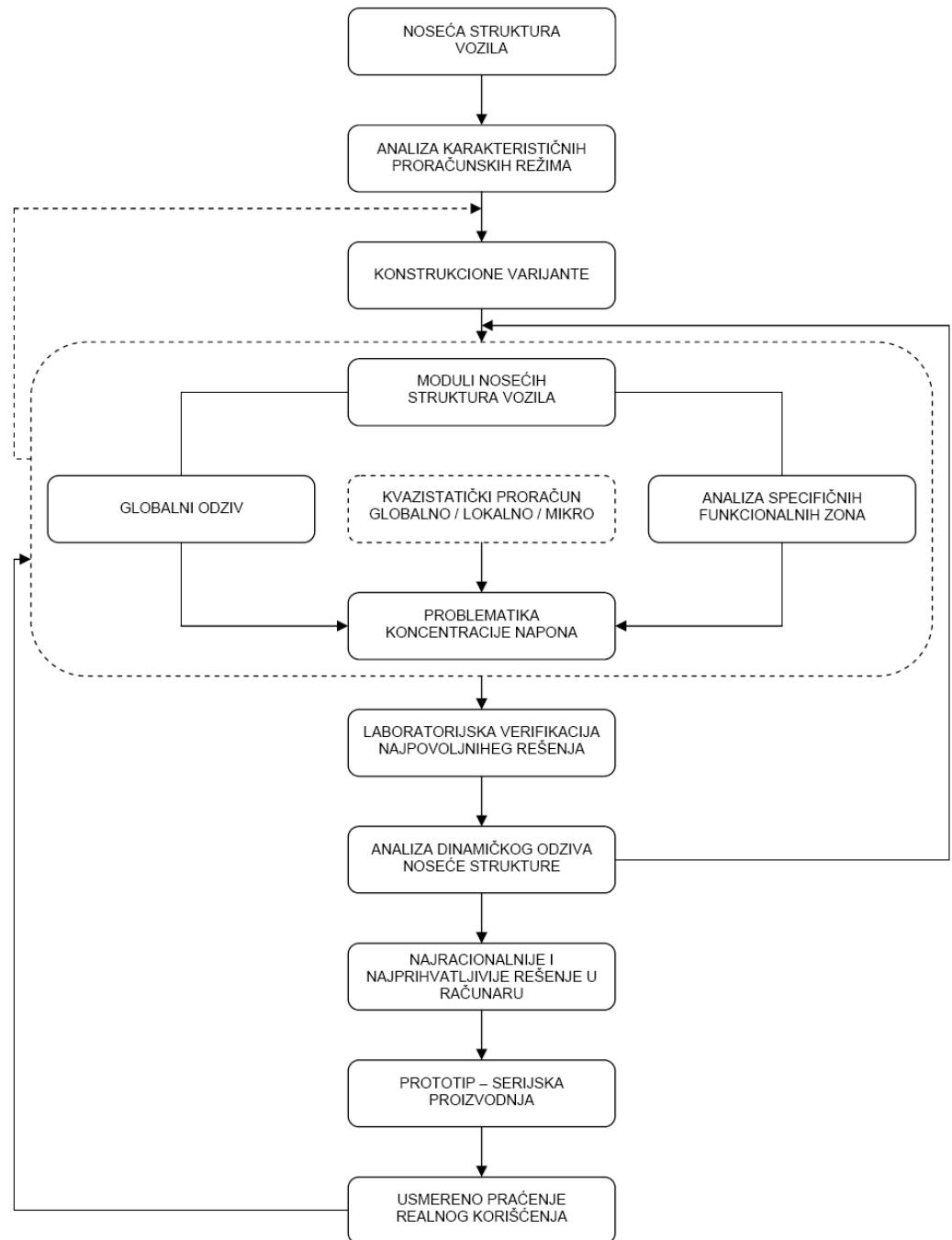
Princip **varijantnih** rešenja je u više navrata istican, a ogleda se u činjenici da se njime obezbedjuje usmeravnje kompletnog numeričkog prototajpinga ka konstrukcijskom rešenju koga karakteriše najprihvatljiviji odziv pri merodavnim karakterističnim proračunskim režimima (KPR).

Dakle, ovo ne znači da je usvojena najbolja moguća konstrukcija, već samo da izdvojeno konstrukcijsko rešenje karakterišu najpovoljniji proračunski odzivi u odnosu na ostala raspoloživa varijantna rešenja. Prema tome, izdvojeno je i usvojeno najpovoljnije rešenje, koje je razvojni tim u stanju da ponudi. Medjutim, i ovakvo stanje (kojim se objektivno utvrđuje najpogodnije konstrukcijsko rešenje) je najčešće dovoljno za ostvarenje efikasnog i intenzivnog razvoja NS.

# Proračun NS primenom MKE

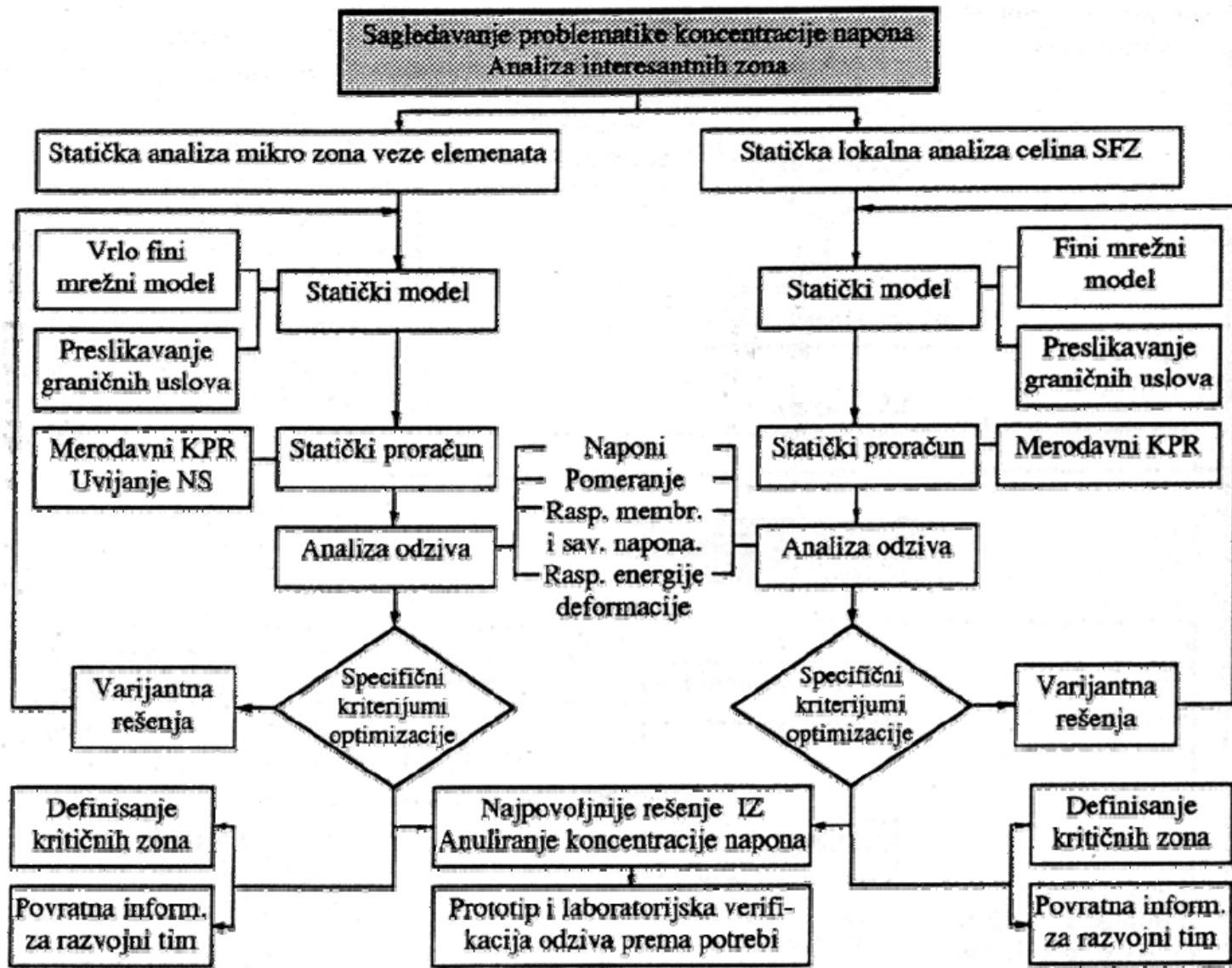
*Predloženi metodološki  
prilaz podrazumeva brojne  
razvojne aktivnosti, koje se  
medjusobno prepliću,  
nadovezuju i dopunjuju.*

*Moguće je sistematizovati  
zaokružene celine,  
koje imaju svoj sadržaj,  
procedure i kriterijume u  
okviru optimizacionog  
ciklusa.*



# Proračun NS primenom MKE

*Ilustrativni prikaz segmenta koji se odnosi na sagledavanje problematike koncentracije napona*



# Proračun NS primenom MKE

## Problematika koncentracije napona

Sagledavanje ove problematike podrazumeva fine i vrlo fine mrežne modele, zavisno da li je u pitanju lokalna analiza sklopova **SFZ**, ili je reč o mikrozoni medjusobne veze pojedinih elemenata.

Posebna pažnja se poklanja obezbedjivanju objektivnog preslikavanja **realnih graničnih uslova** koji karakterišu merodavne KPR.

Treba istaći da se ovako detaljne analize uglavnom rade za asimetričan slučaj opterećenja (uvijanje), pogotovo kada je u pitanju npr. okvir (NS od nosača tankozidnog otvorenog poprečnog preseka).

Složenost distribucije asimetričnog opterećenja je posledica prisustva **sprečene** deplanacije poprečnog preseka u medjusobnom spoju pojedinih elemenata, odnosno pojave bimomenta.

# Numerički prototajping (NP)

## Modeliranje

*Modeliranje strukture je najosetljivije, **najvažnije** i najteže savladivo mesto sistema proračuna.*

*Modeliranje predstavlja kompleksan proces preslikavanja fizičkog modela u računarski primenom idealizacije.*

*Fizički model sa svojom geometrijom i graničnim uslovima (oslonci i opterećenja) i pretpostavljena vrsta i raspored pomeranja, deformacije i napona po modelu čine polaznu osnovu procesa modeliranja.*

*Važan deo koncipiranja modeliranja predstavlja iskustvo i intuitivnost inženjera, koji iskazuju veliku kreativnost uz malo rada na računaru.*

# Numerički prototajping (NP)

**Modeliranje** (predstavlja preslikavanje fizičkog modela u računarski model) obuhvata više celina:

**Analiza** dokumentacije konstrukcije koja se analizira,

Izbor tipa ili tipova KE i **diskretizacija** fizičkog modela,

**Definisanje** čvornih tačaka, koje su proistekle diskretizacijom,

Definisanje **graničnih uslova**,

**Definisanje** konačnih elemenata i

Definisanje **opterećenja**.

# Numerički prototajping (NP)

## Napomene:

*Imajući u vidu da je definisanje merodavnih opterećenja već dato u uvodnom delu i da ono **ne zavsi** od primenjene metode proračuna, kao i to da su predstavljeni takođe i kriterijumi ocene u okviru procesa optimizacije strukture, ovde će se samo načelno dati prikazi koji ilustrativno prate opšte smernice i preporuke, kao i napomene iznete u prethodnom tekstu.*

*Naime, cilj kompletnog ovog uvodnog prikaza MKE je da se naznače osnovne **moгуćnosti** njene primene pri proračunu, odnosno analizi ponašanja NS sa aspekta čvrstoće.*

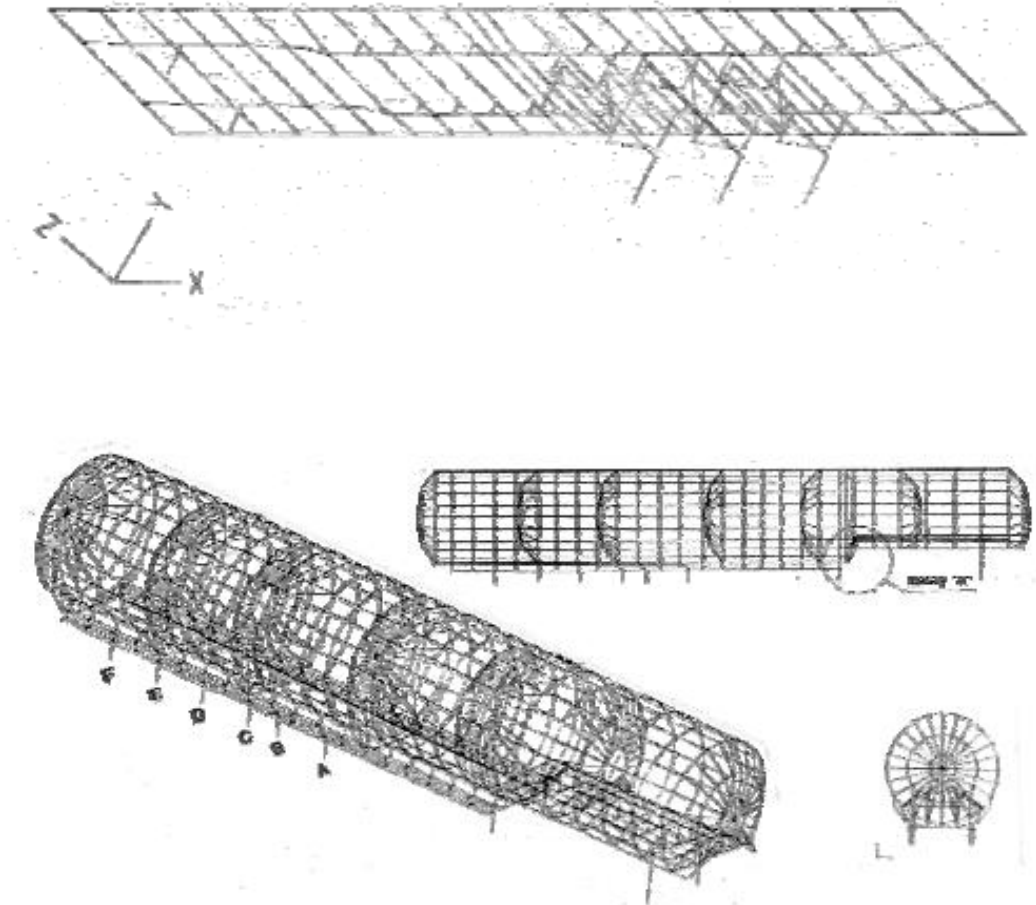
*Kroz predstavljanje problematike identifikacije ponašanja NS za karakteristične kategorije vozila, odnosno struktura biće detaljnijih prikaza i komentara, a sada samo ilustrativno da se uz grafičke prikaze prokomentarišu izneta osnovna obeležja MKE.*

# Numerički prototajping (NP)

*Kada je reč o izboru KE, sama konstrukcija često uslovljava sam izbor.*

*Na slici je predstavljen globalni model poluprikolice sa lestvičastim **okvirom**, odnosno aluminijumske poluprikolice sa samonosećim **rezervoarom**.*

*Jasno je da sama konstrukcija u velikom stepenu opredeljuje izbor konačnog elementa pri formiranju proračunskog diskretizovanog modela.*



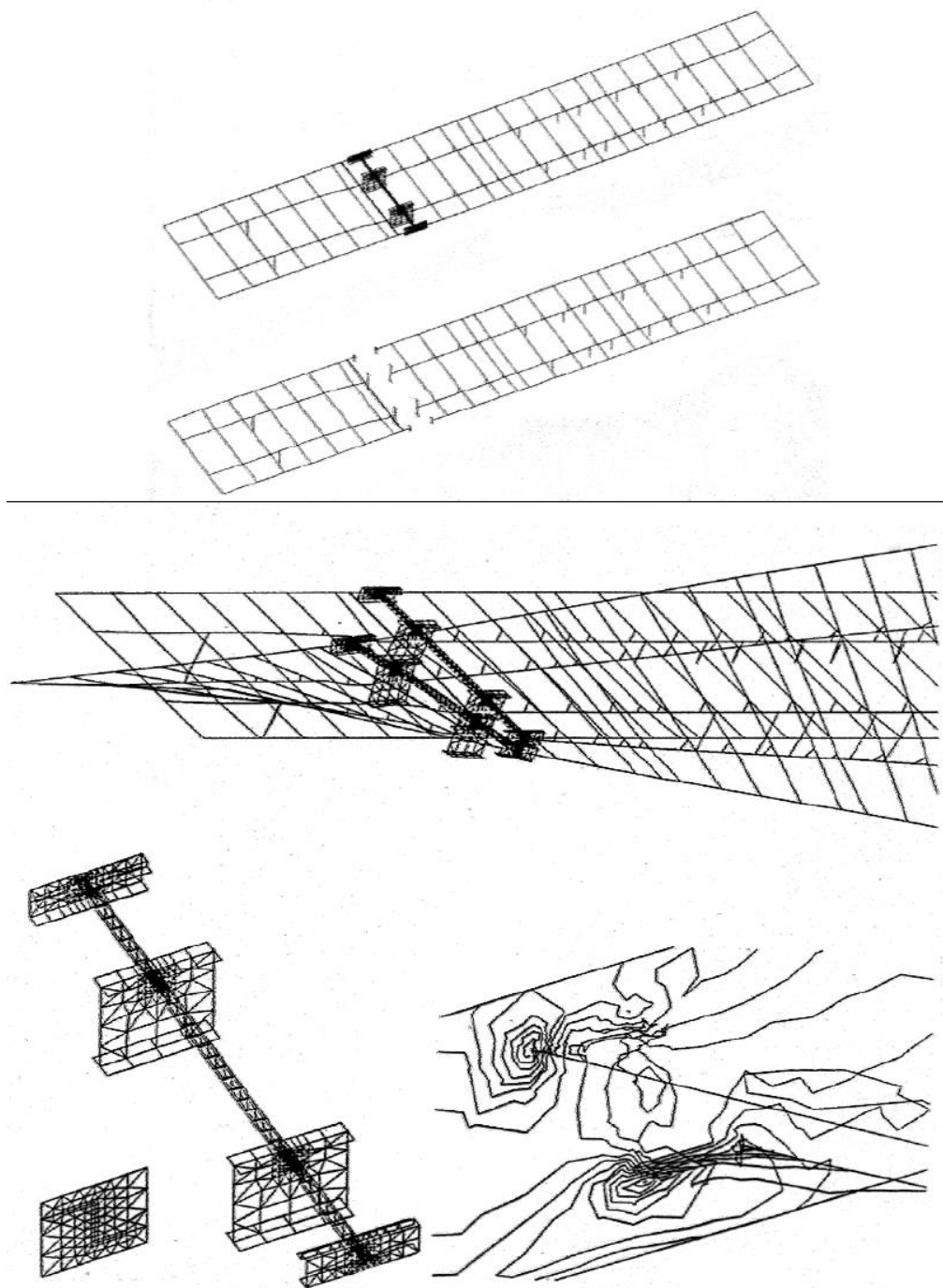
# Numerički prototajping (NP)

*Na slici je dat prikaz karakterističnih modela, odnosno proračunskih odziva koji ilustrativno predstavljaju relaciju GLOBALNO/ LOKALNO/ MIKRO analize, koja praktično opredeljuje sveobuhvatnost i dubinu analize koja se sprovodi.*

*Globalno ponašanje (čitave NS),*

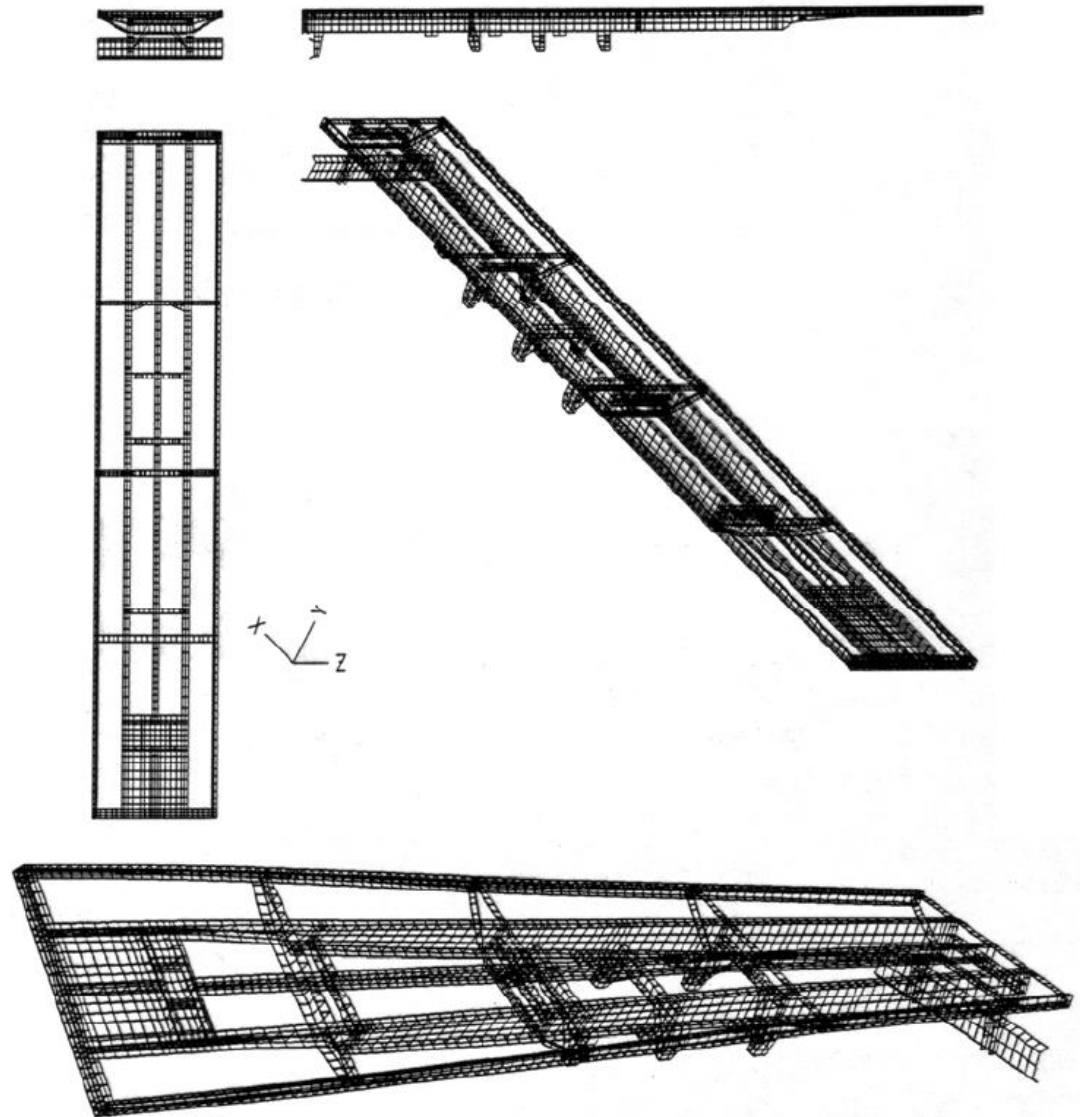
*Lokalno ponašanje (karakteristične zone, u ovom slučaju zone veze osnovnih nosača),*

*Ponašanje mikro zone (zone zavarivanja u spojevima pomenutih osnovnih nosača).*



# Numerički prototajping (NP)

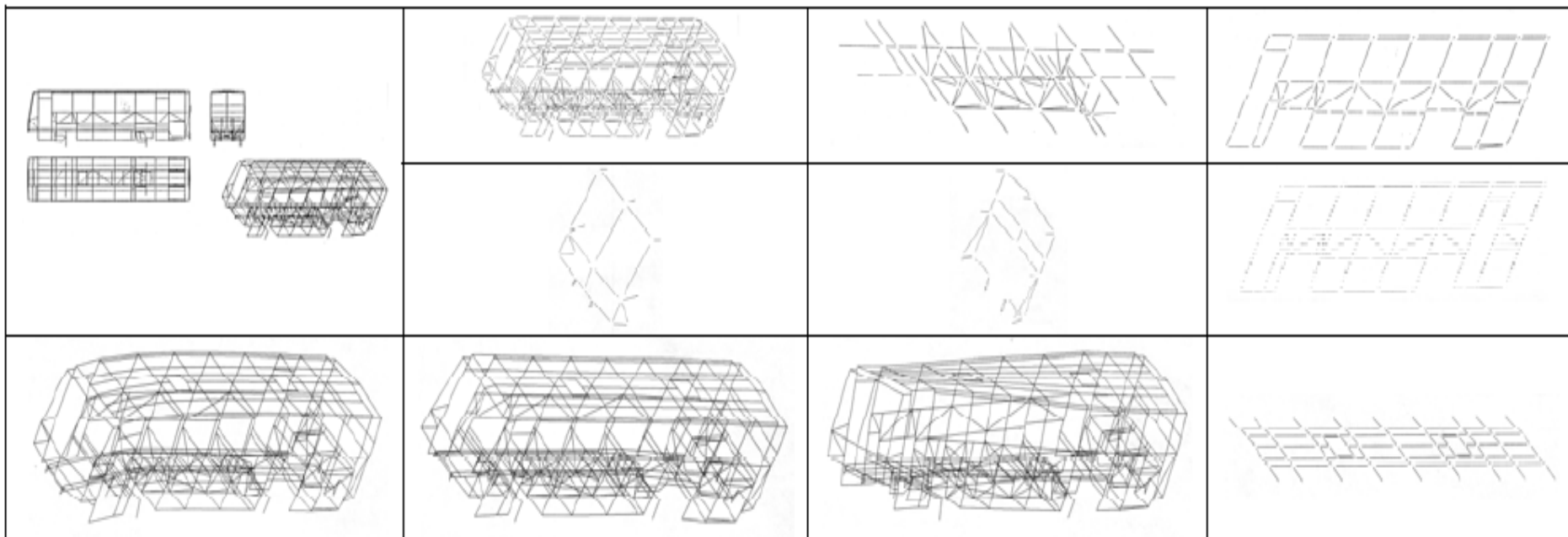
*Na slici je predstavljen diskretizovan model završnog proračuna univerzalne poluprikolice.*



# Numerički prototajping (NP)

Na slici se može sagledati **modularnost** pri formiranju diskretizovanih modela, a na primeru autobusa.

Uočljiva je primena principa **tehnološkog** formiranja NS pri formiranju diskretizovanog modela za proračun.



# Numerički prototajping (NP)

*Proračun struktura primenom MKE omogućava:*

*Određivanje stvarne slike pomeranja i napona,*

*Iznalaženje stvarnog ponašanja konstrukcije i njenih elemenata,*

*Pouzdanu prognozu reagovanja konstrukcije u eksploataciji,*

*Dobijanje **elemenata za odlučivanje** (režim rada, sanacija, rekonstrukcija, optimizacija i potvrđivanje izbora vrste rešenja konstrukcije),*

*Određivanje **uzroka “lošeg”** ponašanja ili popuštanja konstrukcije, procenu eksploatacionog veka i vremena pouzdanog rada konstrukcije.*

# Numerički prototajping (NP)

Opravdanje za ovakav pristup nalazi se u činjenici da **naponsko stanje u konstrukciji zavisi** od:

**Geometrije** noseće strukture, (raspored i dimenzije nosećih elemenata),

Opterećenja i načina oslanjanja (**graničnih uslova**).

Naponsko stanje ne zavisi od vrste materijala (**linearna** analiza).

Svako eventualno neznatno **smanjenje** napona i njegove koncentracije, koje se može postići ovakvim pristupom, omogućava značajno **produženje** eksploatacionog **veka** konstrukcije, odnosno bitno povećanje njene **pouzdanosti**.

# Numerički prototajping (NP)

## Varijantna rešenja i njihov značaj

Varijantna rešenja podrazumevaju **kompatibilnu uporednu analizu pri primeni MKE.**

Dakle u istim uslovima proračuna (granični uslovi, spoljnje opterećenje i sl.) od **više** raspoloživih varijanti jednoznačno se može **izabrati najbolja** od njih.

To je najčešće sasvim **dovoljno**, pogotovo zbog činjenice da se po pravilu u uporednu analizu uključuje i **ponašanje postojećeg rešenja, čije ponašanje u eksploataciji poznajemo.**

# Numerički prototajping (NP)

## Zaključne napomene:

*Potvrda tvrdnje da ne treba **potcenjivati** kvazistatički proračun, ako se sprovodi kvalitetnom metodom (MKE) i na sistematičan način.*

*Dakle, kvalitetna analiza, postojanja modela koji odgovara konstrukciji koja se već koristi, uz lab. verifikaciju globalnog odziva (potvrde graničnih uslova sa spoljnim svetom)...., Imamo validovan model i svi zaključci po pitanju usmeravanja razvoja su odgovarajući (adekvatni).*

*Verifikacija (validacija) modela od presudnog značaja. Može na više načina.*

- da imamo model koji odgovara konstrukciji koja je već u eksploataciji,*
- laboratorijska provera graničnih uslova (globalnog deformacijskog odziva), ...,*
- ragistrovanje napona na karakterističnim mestima,*
- ...*

*Svaka konstrukcija NS može biti i bolja i da je to stvar raspoloživih resursa.*

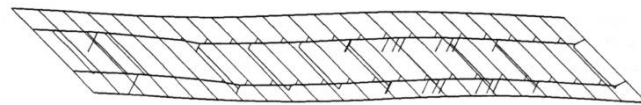
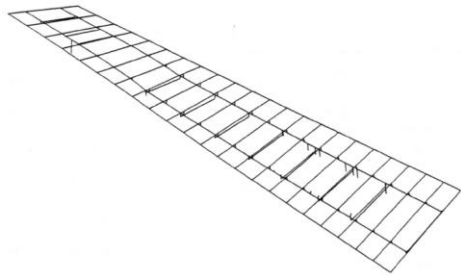
# Granični uslovi

## veza sa spoljnim svetom

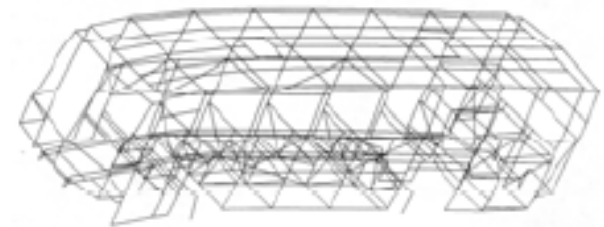
***Diskretizovan proračunski model (Izbor tipa ili tipova KE, definisanje čvornih tačaka, graničnih uslova, KE, opterećenja).***

***Granični uslovi (veza sa spoljnim svetom) posebno značajna, pogotovo u situaciji lokalnih celina i sklopova, specifičnih funkcionalnih zona, ili mikro zona.***

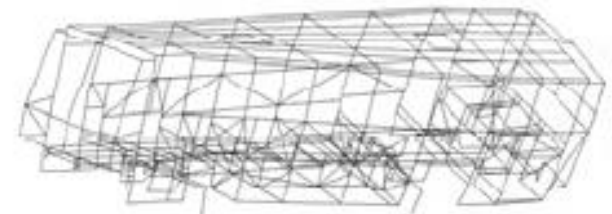
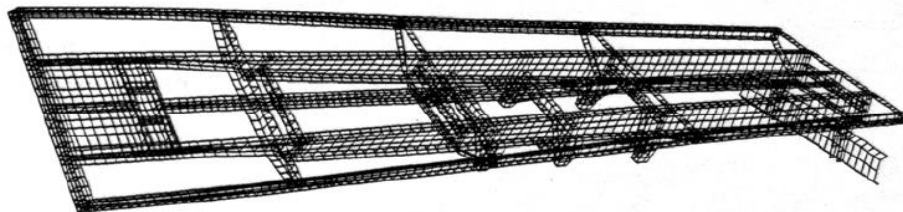
***Globalni odziv karakteriše fizikalnost graničnih uslova (prema konkretnom KPR – kontakt kretača i tla)***



KPR1



KPR3



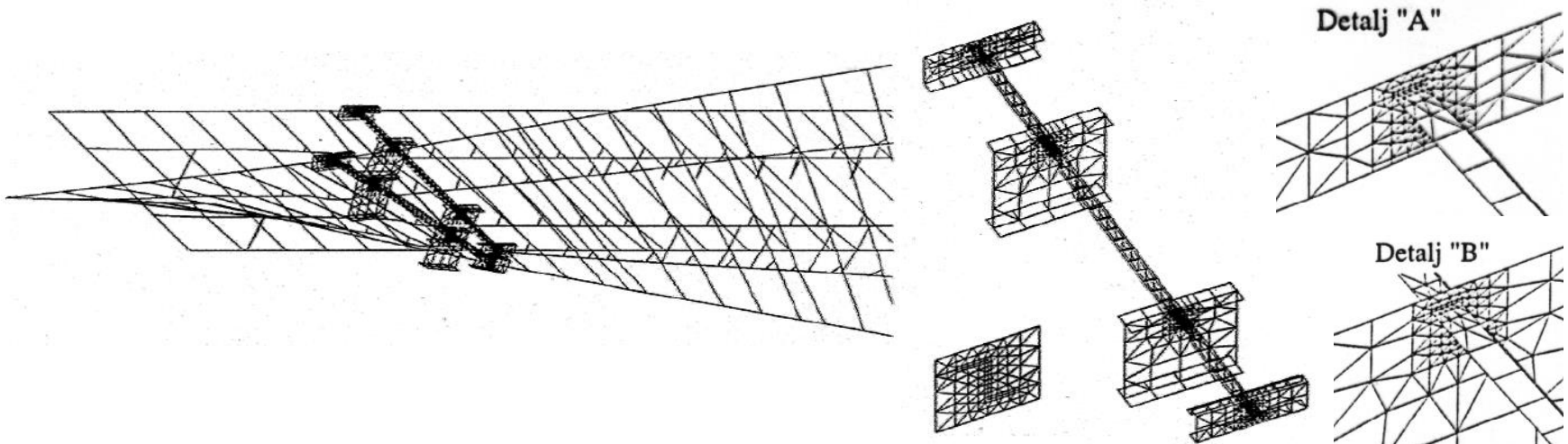
# Granični uslovi

## veza sa spoljnim svetom

Interesantna zona unutar strukture može se analizirati na dva načina:

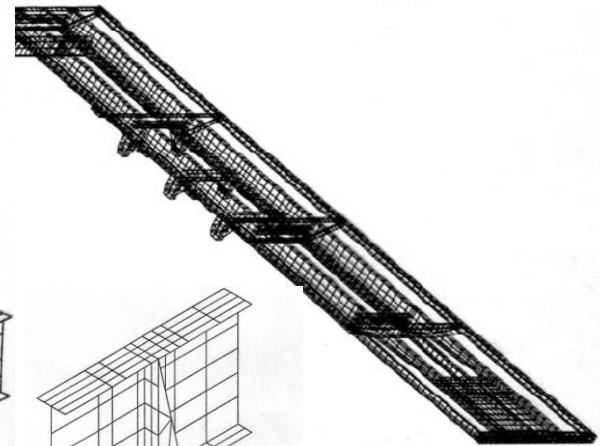
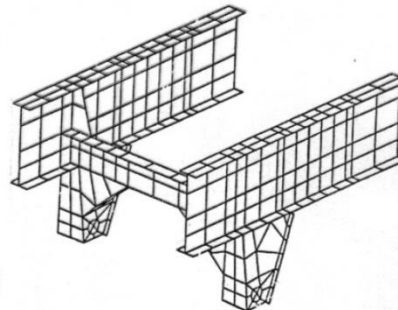
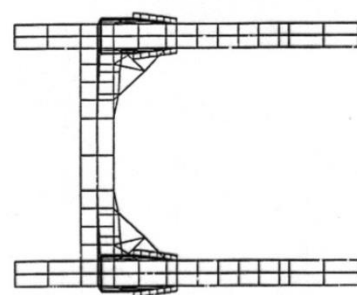
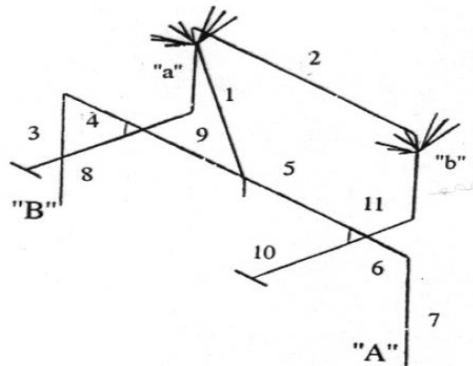
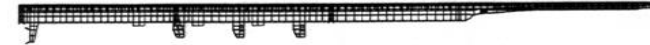
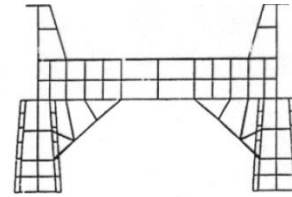
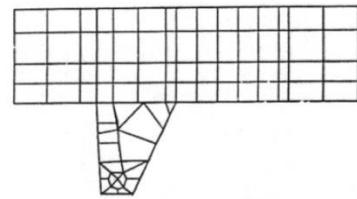
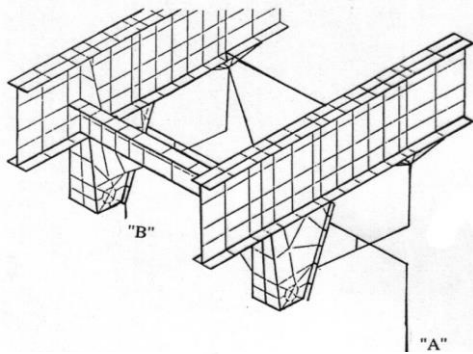
U okviru globalnog modela sa adekvatno modeliranim uključanjem diskretizovanog modela posmatrane zone u globalni model (globalni model dovodi posmatranu zonu u realne uslove za konkretni KPR).

Izdvojenom analizom diskretizovanog modela zone koja zahteva preslikavanje svih uticaja na krajnjim presecima (koji iz veze sa globalnim modelom prerastaju u vezu sa spoljnim svetom). Dakle, uvođenjem svih deformacija (3 pomeranja i 3 nagiba) na krajnjim presecima, posmatrana zona se dovodi u istovetne uslove, koje uzrokuju identične odzive.



# Granični uslovi veza sa spoljnim svetom

Kada interesantna **Zona** predstavlja segment strukture gde kompletna konstrukcija ima **vezu sa spoljnim svetom**, može se primeniti princip **akcije-reakcije**. Ovaj princip znači da se formira diskretizovan model nešto većeg segmenta od razmatrane interesantne zone, a da se **poznata opterećenja** (za pojedine KPR) unesu u kontaktnim tačkama strukture i okruženja **umesto graničnih uslova**.



**Sistem oslanjanja poluprikolice**

**Zona vazdušnog jastuka**

# Granični uslovi veza sa spoljnim svetom

## Primena principa akcije-reakcije

*Primer sanacije kritične  
zone u elementima veze  
sistema za oslanjanje  
autobusa*

*(Zona uključenja vršnih  
koncentrisanih  
sila u NS autobusa)*

