

Koncipiranje nosive strukture vozila obzirom na otpornost kod sudara

Pikutić, Alan

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:794156>

Rights / Prava: [In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-05-15**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Alan Pikutić

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Goran Šagi, dipl. ing.

Student:

Alan Pikutić

Zagreb, 2023.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru, doc. dr. s. Goranu Šagiju, na ukazanoj pomoći, savjetima i izdvojenom vremenu.

Alan Pikutić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
Procesno-energetski, konstrukcijski, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodogradnja

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 23 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 23 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Alan Pikutić**

JMBAG: **0035220064**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Koncipiranje nosive strukture vozila obzirom na otpornost kod sudara**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Designing vehicle structure with regard to crashworthiness**

Opis zadatka:

Moderna cestovna motorna vozila tijekom razvoja prolaze rigorozne testove u kojima se simuliraju različiti tipovi sudara (engl. *crash tests*) s ciljem formiranja nosive strukture vozila koja će omogućiti preživljavanje putnika u slučaju takvih sudara u realnoj situaciji. Nosiva struktura vozila mora biti tako oblikovana da apsorbira energiju sudara i da omogući povoljan tok sila kroz elemente nosive strukture vozila.

U okviru završnog rada potrebno je:

- napraviti pregled testova simulacija sudara koji se provode u razvoju vozila, uz odgovarajući grafički prikaz testova, navođenje podataka o brzini vozila i preklapanju vozila s preprekom prilikom testova te prikaz oštećenja i deformacija nosive strukture vozila u simuliranim sudarima,
- izračunati opterećenja (sile ili energiju sudara) kod karakterističnih slučajeva sudara,
- analizirati pristupe proizvođača prilikom koncipiranja nosive strukture vozila gledano kroz izvedbe zona deformacija, položaj bitnih elemenata nosive strukture, omogućavanje povoljnog tok sila kroz nosivu strukturu vozila, a za bitne elemente nosive strukture navesti okvirno poprečne presjke, materijale i tehnologiju izrade te tehnologije povezivanja s ostalim elementima nosive strukture vozila,
- za odabrano vozilo izraditi odgovarajuće 2D i 3D modele kompletnog vozila u kojem će biti definirana nosiva struktura vozila uz pomoć pojednostavljenih oblika i volumena, a prilikom smještaja elemenata nosive strukture vozila predvidjeti da ostane dovoljno slobodnog mjesta za ostale ključne komponente vozila i za odgovarajuće otvore na vozilu,
- smještaj pojedinih komponenata nosive strukture vozila prikazati odgovarajućim projekcijama i presjecima te popratiti obrazloženjima odabira smještaja elementa nosive strukture vozila.

Izrađeni model nosive strukture vozila definiran jednostavnim volumenima i izračunate sile ili energija sudara služili bi kao podloga za topološko optimiranje nosive strukture vozila.

Pri izradi se treba pridržavati uobičajenih pravila za izradu završnog rada. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. 11. 2022.

Datum predaje rada:

1. rok: 20. 2. 2023.
2. rok (izvanredni): 10. 7. 2023.
3. rok: 18. 9. 2023.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27. 2. – 3. 3. 2023.
2. rok (izvanredni): 14. 7. 2023.
3. rok: 25. 9. – 29. 9. 2023.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Goran Šagi

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	II
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD.....	1
1.1 Euro NCAP	3
1.1.1 Udar u nepokretnu barijeru	7
1.1.2 Bočni udar s pomičnom barijerom.....	9
1.1.3 Bočni udar – nepomični stup	11
1.1.4 Ostali testovi	13
1.2 IIHS.....	14
1.2.1 Frontalni testovi	15
1.2.2 Bočni test	20
2. Odabir testova za nastavak rada	22
2.1 Frontalni udar – izračun energije i sile.....	22
2.2 Bočni udar - izračun energije i sile	26
3. Pregled postojećih rješenja	27
3.1 BIW	27
3.2 Materijali izrade	29
3.3 Tehnologije povezivanja	34
4. Modeliranje.....	37
5. Tok sila	50
5.1 Frontalni udar, 100 % preklop	50
5.2 Frontalni udar, 25 % preklop	52
5.3 Bočni udar	54
6. Priprema za topološko optimiranje.....	56
7. ZAKLJUČAK.....	57

POPIS SLIKA

Slika 1. Učestalost sudara s obzirom na dio vozila koji sudjeluje u sudaru [1]	1
Slika 2. Udio prednjeg dijela vozila koji sudjeluje u sudarima [1]	2
Slika 3. Logo Euro NCAP-a [4]	3
Slika 4. Shematski prikaz MPDB testa [4]	4
Slika 5. Prikaz oštećenja nosive strukture 1, MPDB test [5]	5
Slika 6. Prikaz oštećenja nosive strukture 2, MPDB test [5]	6
Slika 7. Udar u nepokretnu barijeru s potpunim preklapanjem, shematski prikaz [4]	7
Slika 8. Prikaz oštećenja vozila 1, udar u nepokretnu barijeru [5]	8
Slika 9. Prikaz oštećenja vozila 1, udar u nepokretnu barijeru [5]	8
Slika 10. Shematski prikaz testa bočni udar s pomičnom barijerom, [4]	9
Slika 11. Oštećenje vozila 1, bočni udar [5]	10
Slika 12. Oštećenje vozila 2, bočni udar [5]	10
Slika 13. Shematski prikaz testa bočni udar u nepomični stup [4]	11
Slika 14. Prikaz oštećenja nosive strukture vozila 1, bočni udar u stup [5]	12
Slika 15. Prikaz oštećenja nosive strukture vozila 2, bočni udar u stup [5]	12
Slika 16. Logo organizacije IIHS [6]	14
Slika 17. Frontalni testovi IIHS-a [6]	15
Slika 18. Shematski prikaz testa prednji udar sa srednjim preklapanjem [6]	16
Slika 19. Deformacije nosive strukture kod testa prednji udar sa srednjim preklapanjem [6]	16
Slika 20. Shematski prikaz <i>driver-side small overlap</i> testa [6]	17
Slika 21. <i>Small overlap test</i> , oštećenje 1 [7]	18
Slika 22. <i>Small overlap test</i> , oštećenje 2 [7]	19
Slika 23. Shematski prikaz IIHS-ovog bočnog testa [6]	20
Slika 24. Oštećenje strukture vozila kod bočnog testa [7]	21
Slika 25. Oštećenje strukture vozila kod bočnog testa [7]	21
Slika 26. Vrijednosti kinetičke energije [15]	23
Slika 27. Dijagram promjene akceleracije vozila tijekom frontalnog udara [15]	24

Slika 28. Raspodjela sile tijekom frontalnog udara [21]	25
Slika 29. Pregled osnovnih dijelova BIW [1]	27
Slika 30. Prikaz toka sila kod frontalnog udara [17]	28
Slika 31. Prikaz toka sila kod bočnog udara [17]	28
Slika 32. Prikaz podjele BIW-a na tri dijela [18]	29
Slika 33. Korišteni materijali, model Audi Q8 [10]	30
Slika 34. Korišteni materijali, Audi A3 [10]	30
Slika 35. Prikaz vlačnih čvrstoća pojedinih elemenata BIW-a [16]	31
Slika 36. Simulacija deformacije cijevi [20]	32
Slika 37. Primjer kombinacije struktura - cijev ispunjena metalnom (a) i polistirenskom (b) pjenom [20]	32
Slika 38. <i>Sandwich</i> strukture [20]	33
Slika 39. <i>Honeycomb</i> strukture [20]	33
Slika 40. Primjeri mehaničkih učvršćivača [12]	34
Slika 41. Grubi prikaz mjesta korištenja pojedinih vrsta povezivanja [13]	35
Slika 42. Prikaz metoda povezivanja korištenih u modelu Porsche Taycan [14]	35
Slika 43. Prikaz metoda povezivanja korištenih u modelu Audi A8 [10]	36
Slika 44. Konačan model BIW-a s putnicima, motorom, kotačima i konturama vozila	37
Slika 45. Stvarni uzori za model	38
Slika 46. Osnova BIW-a za daljnje modeliranje	38
Slika 47. BIW s dodanim ojačanjima vrata i ojačanjima prednjeg i stražnjeg stakla	39
Slika 48. Nadogradnja BIW-a s krovnim elementima	40
Slika 49. Nadogradnja BIW-a s krovnim elementima, stražnji pogled	40
Slika 50. Nadogradnja BIW-a s elementima u vratima i podnici	41
Slika 51. Pogled na ojačanja podnice u tlocrtu	41
Slika 52. Pogled na stražnju prazninu	42
Slika 53. Nadogradnje prednje strane BIW-a, prednji pogled	43
Slika 54. Nadogradnja prednje strane BIW-a, tlocrt	43
Slika 55. Pogled na vatrozid i okvir motora	44

Slika 56. Motor ugrađen u predviđenom prostoru	44
Slika 57. Prednja <i>crash</i> struktura povezana s prednjim uzdužnim nosačem	45
Slika 58. Prednji vezni element.....	45
Slika 59. Prednji nosači amortizera s ojačanjem.....	46
Slika 60. Konačna verzija prednjeg dijela BIW-a.....	47
Slika 61. Nadogradnja BIW-a stražnjim elementima, pogled straga	47
Slika 62. Nadogradnja BIW-a stražnjim elementima.....	48
Slika 63. Stražnja <i>crash</i> struktura i nosači stražnjih amortizera	48
Slika 64. Konačna verzija stražnjeg dijela BIW-a	49
Slika 65. Konačan model BIW-a.....	49
Slika 66. Prikaz testa frontalni udar s 100 % preklopom u CAD-u	50
Slika 67. Frontalni udar, 100 % preklop, prikaz toka sila.....	51
Slika 68. Frontalni udar, 100 % preklop, prikaz toka sila, pogled iz tlocrta	51
Slika 69. Prikaz testa frontalni udar s 25 % preklopom u CAD-u	52
Slika 70. Prikaz testa frontalni udar s 25 % preklopom u CAD-u, pogled iz tlocrta	52
Slika 71. Frontalni udar, 25 % preklop, prikaz toka sila.....	53
Slika 72. Prikaz testa bočni udar s u CAD-u.....	54
Slika 73. Tok sila kod bočnog udara	54
Slika 74. Tok sila kod bočnog udara, pogled iz tlocrta	55
Slika 75. Pet koraka razvoja BIW-a vozila [13].....	56

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
v	km/h	brzina kretanja barijere i vozila u testu frontalnog udara
m_b	kg	masa barijere u testu frontalnog udara
m_v	kg	masa vozila u testu frontalnog udara
E_{kF}	kJ	kinetička energija testa frontalnog udara
E_{kFV}	kJ	kinetička energija vozila u testu frontalnog udara
E_{kFB}	kJ	kinetička energija barijere u testu frontalnog udara
E_k	kJ	osnovni izraz kinetičke energije
x_F	m	put na kojem djeluje sila u testu frontalnog udara
F_{avgF}	kN	prosječna vrijednost sile koja djeluje na vozila prilikom testa frontalnog udara
E_{kB}	kJ	kinetička energija testa bočnog udara
m_{bB}	kg	masa barijere u testu bočnog udara
v_B	km/h	brzina kretanja barijere u testu bočnog udara
E_{kB}	kJ	kinetička energija testa bočnog udara
x_B	m	put na kojem djeluje sila u testu bočnog udara
F_{avgB}	kN	prosječna vrijednost sila koja djeluje na vozilo prilikom testa bočnog udara
$L103$	m	duljina vozila
$W103$	m	širina vozila
$H100$	m	visina vozila
M_{BiW}	kg	približna masa BIW-a
ρ	kg/m ³	gustoća čelika
L	m	približna vrijednost duljine modeliranog vozila
W	m	približna vrijednost širine modeliranog vozila
H	m	približna vrijednost visine modeliranog vozila

SAŽETAK

Zadatak rada je koncepcija nosive strukture vozila s gledišta otpornosti na sudare. Prije koncipiranja same nosive strukture, napravljena je analiza karakterističnih simulacija sudara, pregled karakterističnih stvarnih rješenja nosive strukture vozila, materijala i načina povezivanja elemenata nosive strukture vozila. Temeljem provedenih analiza krenulo se u koncepcijsku razradu nosive strukture vozila. Koncepcijska razrada je u radu detaljno prikazana i objašnjena segment po segment nosive strukture. Sama nosiva struktura koncipirana je tako da bi trebala omogućiti apsorbiranje energije sudara s povoljnim tokom sila kroz elemente nosive strukture vozila i u konačnici zaštitu putnika u vozilu prilikom sudara.

Ključne riječi: nosiva struktura vozila, simulacija sudara, zona deformacije, zaštita putnika, Euro NCAP, IIHS, NHTSA,

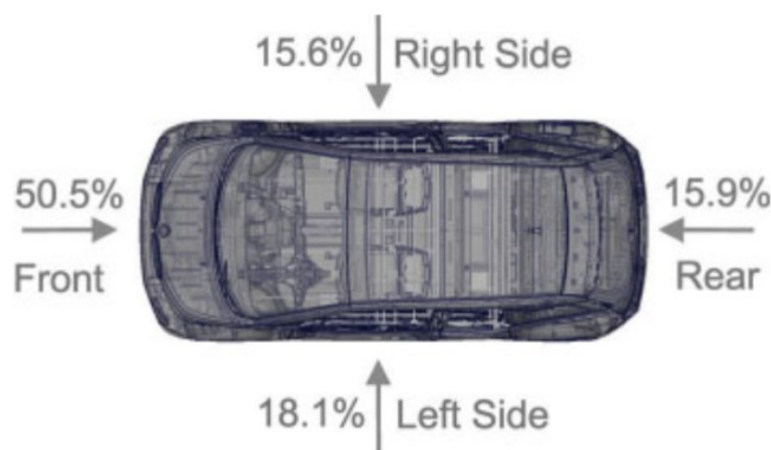
SUMMARY

The goal of this thesis is development of a body in white structure, while putting great focus on crash protection. Before the development, an overview of the usual crash simulations, real examples of car body structures, used materials and connecting methods has been conducted. After the overview, a conceptual development of body in white has been made. Development process has been detaily showed and described for each segment of the body structure. The body in white is designed to enable crash energy absorbtion with efficient load path through the elements of body in white, to ensure adequate protection of the occupants.

Keywords: body in white, crash test, crash structure, occupant protection, Euro NCAP, IIHS, NHTSA

1. UVOD

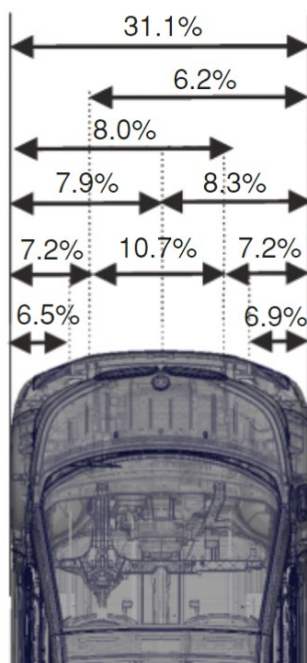
Osim kontinuirano rastućih zahtjeva za sve udobnijim, štedljivijim, te tehnološki naprednijim automobilima, jednako tako proizvođači se susreću sa zahtjevima za što sigurnije automobile. U pogledu sigurnosti automobila, može se pričati o aktivnoj i pasivnoj sigurnosti. Pod aktivnom sigurnošću smatraju se svi sustavi na vozilima koji svojim djelovanjem za cilj imaju izbjegavanje samog sudara. Pasivna sigurnost je ono što će biti pobliža tema ovoga rada, točnije, sam način kako nosiva struktura vozila raspodjeljuje sile i štiti putnike vozila. S obzirom da su najbolji način za kontrolu same nosive strukture vozila ispitivanja *crash* testovima, uvodni dio ovog rada napraviti će pregled aktualnih protokola *crash* testova u svijetu.



Slika 1. Učestalost sudara s obzirom na dio vozila koji sudjeluje u sudaru [1]

Slika 1. prikazuje statističku raspodjelu stvarnih sudara s obzirom na dio vozila koji preuzima energiju udara. Kako su sudari s prednjim dijelom vozila odgovorni za više slučajeva sa smrtnim ishodom ili ishodom s ozbiljnim ozljedama od bilo kojeg drugog sudara, takvim testovima pridaje se i najveća važnost. U većini nezgoda ovakvog tipa, samo dio širine prednjeg dijela vozila je uključen u sudar i može preuzimati energiju sudara. Statistički podaci govore da su ovakvi sudari najčešći u Europi, a slika 2. prikazuje statistički udio frontalnih sudara, obzirom na udio prednjeg dijela vozila koji je sudjelovao u sudaru. Bočni sudari drugi su po redu što se tiče učestalosti smrtnih ishoda ili ozbiljnih ozljeda.

Poučeni statističkim podacima, većina organizacija kojima je cilj povećanje sigurnosnog standarda vozila u prometu, samim time najviše se bavi frontalnom i bočnom zaštitom putnika u vozilu.



Slika 2. Udio prednjeg dijela vozila koji sudjeluje u sudarima [1]

Neke od glavnih svjetskih organizacija koje provode *crash* testove su Euro NCAP [4] u Europi, te IIHS [6] i NHTSA [8] u Americi. Također, postoje još i Latin NCAP, Global NCAP, JNCAP, C-NCAP, KNCAP... Pretežno se radi o manjim organizacijama zaduženim za testiranje automobila za pojedina tržišta. Primjerice, Latin NCAP će provoditi testiranja automobila specifičnih za južno američko tržište, koji se ne mogu naći na popisu testiranih kod organizacija u Europi ili SAD-u. Sadržaj ovoga rada pretežno će se baviti Euro NCAP-om i IIHS-om, s obzirom da su njihovi testovi najnapredniji u svijetu.

1.1 Euro NCAP

Euro NCAP (engl. *European New Car Assessment Programme*) neprofitna je udruga nastala 1997. godine. Sastavljena je od sedam europskih vlada (Njemačka, UK, Francuska, Austrija, Italija, Nizozemska, Luksemburg), kao i automobilističkih i potrošačkih udruga i tijela (primjerice ADAC, FIA, DEKRA...). Glavni zadatak udruge je kupcima dati nezavisnu pouzdanu, temeljitu i pravovremenu procjenu sigurnosne razine najprodavanijih automobila u Europi. slika 3. prikazuje logo organizacije.

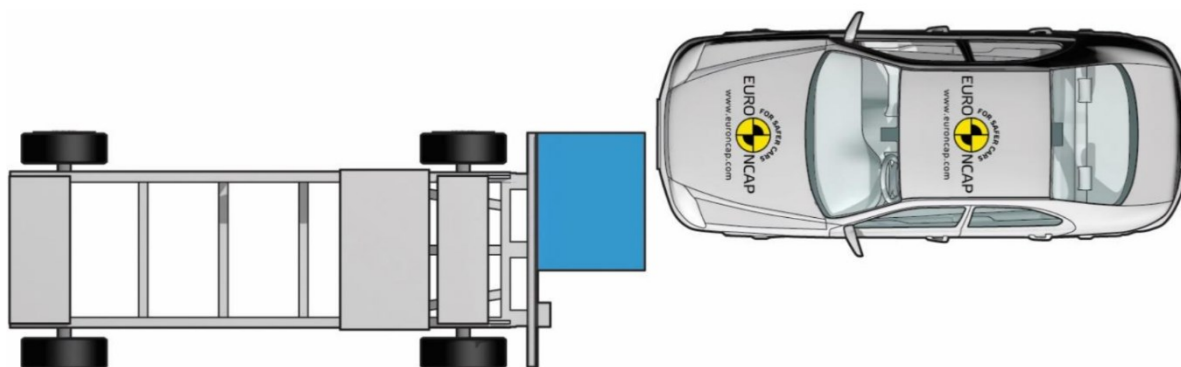


Slika 3. Logo Euro NCAP-a [4]

Naravno, ne testira se svaki automobil na tržištu. Kako bi se dobio što širi raspon informacija za kupce, svake godine odabiru se najpopularniji i najzanimljiviji modeli. U većini slučajeva, radi se o najnovijim modelima koji su se pojavili na tržištu, ali mogu se testirati i modeli koji su već u prodaji. Svaka članica udruge financijski pokriva testiranje barem jednog modela godišnje. Članice mogu odabrati vozilo od veće važnosti za svoje domaće tržište ili primjerice neko vozilo koje u datom trenutku predstavlja neku posebnu važnost u svom tržišnom segmentu. Dodatno, proizvođači mogu sami ustupiti svoja vozila na test. Procedura samoga testiranja jednaka je u oba slučaja. U nastavku poglavlja napravljen je pregled testova koje provodi Euro NCAP.

1.1.1. Sudar s pokretnom progresivno deformabilnom barijerom

Za simulaciju sudara s nepotpunim preklapanjem vozila (engl. *overlap*), Euro NCAP razvio je test sudara s pokretnom progresivno deformabilnom barijerom (engl. *Mobile progressive Deformable Barrier, MPDB*). Test simulira sudar testnog vozila i prosječnog obiteljskog vozila srednje klase. Testirano vozilo brzinom od 50 km/h vozi prema barijeri mase 1400 kg koje također putuje brzinom 50 km/h u suprotnom smjeru. Sudar se odvija sa 50 % širine prednjeg kraja vozila (*overlap*). Barijera je dizajnirana kao prednji kraj drugog automobila, te progresivno postaje kruća kako se sve više deformira. Slika 4. prikazuje shematski prikaz testa.



Slika 4. Shematski prikaz MPDB testa [4]

Kao primjerak najčešćeg segmenta vozila na europskim cestama, za prikaz rezultata testa odabrano je vozilo C segmenta, marke Audi, model A3. Test navedenog vozila proveden je u prosincu 2020. godine, kada su navedeni protokoli testiranja bili aktivni. Navedeno vozilo koristi se kao primjer i u ostalim poglavljima o Euro NCAP-u. Slika 5. i slika 6. prikazuju oštećenja i deformacije vozila nakon provedenog testa.

Mnogi aspekti sigurnosti automobila provjeravaju se u ovome testu. Kako bi se zaštitili putnici, sile sudara moraju biti raspoređene prema dijelovima automobila gdje se energija može sigurno i efikasno apsorbirati. Prednja zona deformacije (engl. *crumple zone*) mora se deformirati na kontrolirani način, ostavljajući iza sebe putnički dio vozila što je moguće manje deformiranim dok istovremeno ne smije putnike izložiti prevelikim vrijednostima deceleracije. Pomak volana i pedala mora biti ograničen kako bi se izbjegle moguće ozljede vozača, ali i ostalih putnika u vozilu. Također, pažnja se obraća i na barijeru. Sam način kako je barijera usporavala i kako je oštećena, govori o tome koliko efikasno su se dva vozila sudarila. Vozila koja na testu prouzroče ekstremne vrijednosti deceleracije barijere ili koja uzrokuju značajnu lokalnu deformaciju barijere okarakteriziraju se kao „loše kompatibilna“. U stvarnom svijetu, takvo vozila možebitno ne bi moglo apsorbirati vlastitu energiju dovoljno efikasno i predstavljalo bi prijetnju ostalim sudionicima u prometu.



Slika 5. Prikaz oštećenja nosive strukture 1, MPDB test [5]

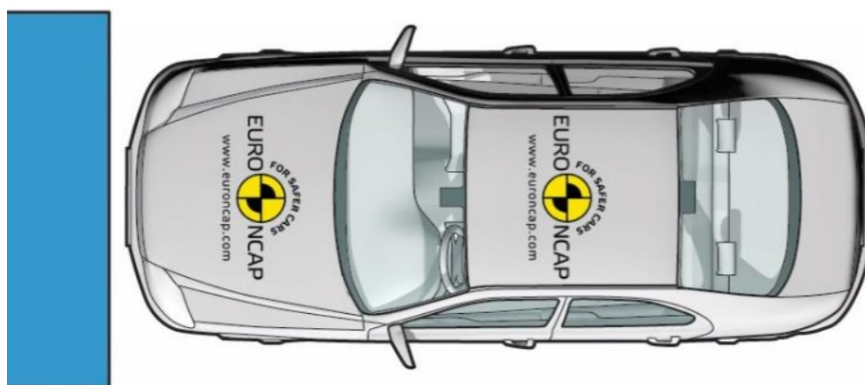


Slika 6. Prikaz oštećenja nosive strukture 2, MPDB test [5]

U ovakvome obliku test je uveden 2020. godine. U prošlosti, test se provodio s 40 % prekrivanja pri brzini 64 km/h, no barijera je tada bila nepomična. U testnom vozilu na prednjim sjedalima smještene su dvije lutke koje simuliraju dvije odrasle muške osobe, te dvije lutke na stražnjim sjedalima koja simuliraju djecu.

1.1.1 Udar u nepokretnu barijeru

Sudar s nepokretnom barijerom predstavlja onakav tip sudara kakav većina ljudi zamisli kada se spomene *crash test*. Automobili se brzinom od 50 km/h cijelom širinom prednjeg dijela vozila sudaraju s nepomičnom barijerom. Na vozačkom i na stražnjem sjedalu smještena je lutka koja simulira ženskog odraslog putnika. Slika 7. prikazuje shematski prikaz testa.



Slika 7. Udar u nepokretnu barijeru s potpunim preklapanjem, shematski prikaz [4]

Test s nepokretnom barijerom manji izazov predstavlja samoj karoseriji automobila i deformacijskim zonama, a veći sustavima zadržavanja putnika, prije svega sigurnosnim pojasevima i sjedalima, kako na prednjim, tako i na stražnjim sjedalima. Uski limiti postavljaju se na vrijednosti deceleracije u zonama prsa putnika i na stupanj defleksije prsa. Slika 8. i slika 9. prikazuju oštećenja vozila nakon testa.



Slika 8. Prikaz oštećenja vozila 1, udar u nepokretnu barijeru [5]

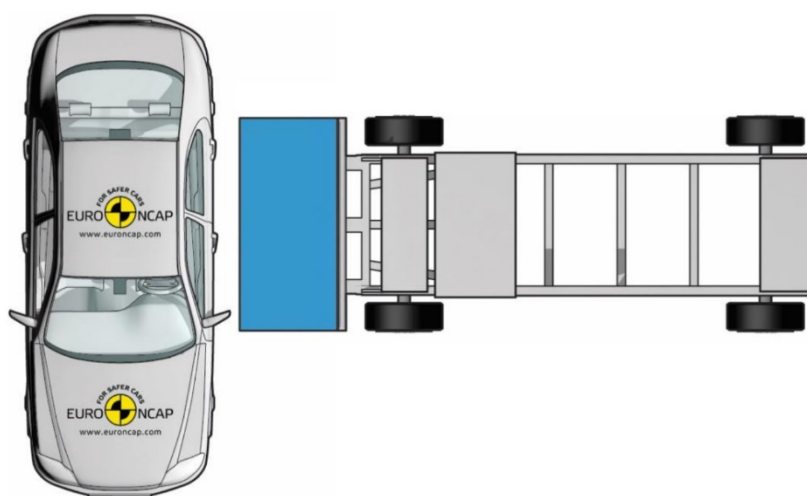


Slika 9. Prikaz oštećenja vozila 1, udar u nepokretnu barijeru [5]

Nabolje rezultate na testu ostvaruju vozila sa sustavima zadržavanja s najboljim balansom između dovoljne krutosti da se zadrži muška lutka i dovoljne popustljivosti da se ne uzrokuju prevelike inercijske sile na manju žensku lutku. Test se u ovakvome obliku provodi od 2015. godine.

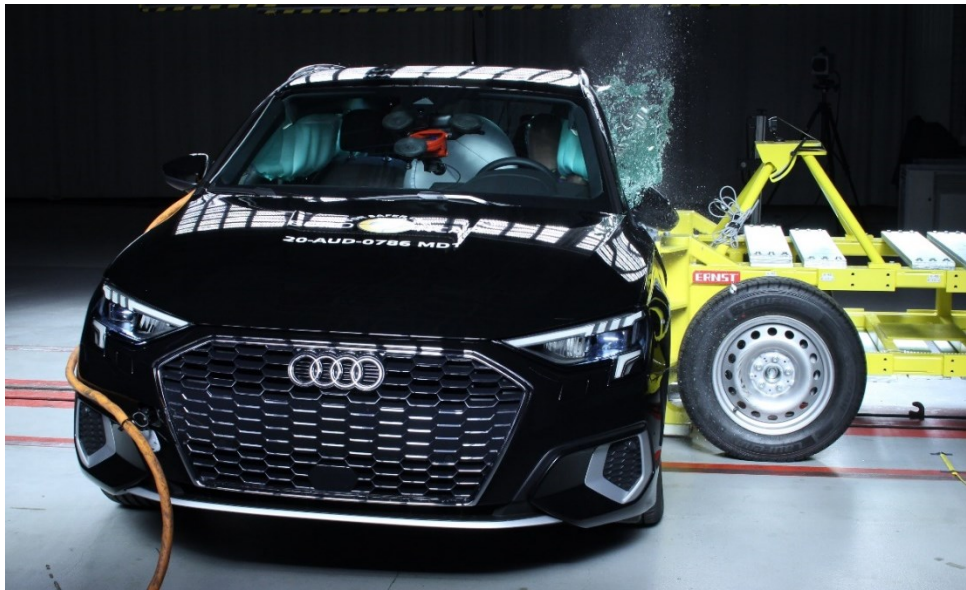
1.1.2 Bočni udar s pomičnom barijerom

U usporedbi s frontalnim udarima, kod bočnih udara prostor unutar vozila koji može apsorbirati energiju znatno je smanjen. Samim time, ozbiljne ozljede glava i prsnog koša vrlo su česte. Kod Euro NCAP-ovoga testa deformabilna barijera montirana je na kolica i sa 60 km/h pod pravim kutom vožena prema stojećem testiranom vozilu. U vozilu su smještene muška lutka na vozačkom sjedalu, te dječje lutke u sjedalicama na stražnjoj klupi. Test je uveden 1997., a unaprijeđen 2020. godine. Slika 10. prikazuje shemu testa.



Slika 10. Shematski prikaz testa bočni udar s pomičnom barijerom, [4]

Test kontrolira adekvatnu zaštitu kritičnih dijelova tijela čime je proizvođačima postavljen zahtjev za ojačavanjem struktura vozila oko B-nosača, boljim smještajem bočnih zračnih jastuka ili zračnih zavjesa, te za razvojem panela vrata i sjedala s boljim karakteristikama apsorpcije energije. Također, kontrolira se i samo vrijeme otvaranja zračnih jastuka kako bi se osigurala što veća zaštita putnika. Slika 11. i slika 12. pokazuju primjer oštećenja automobila nakon testa.



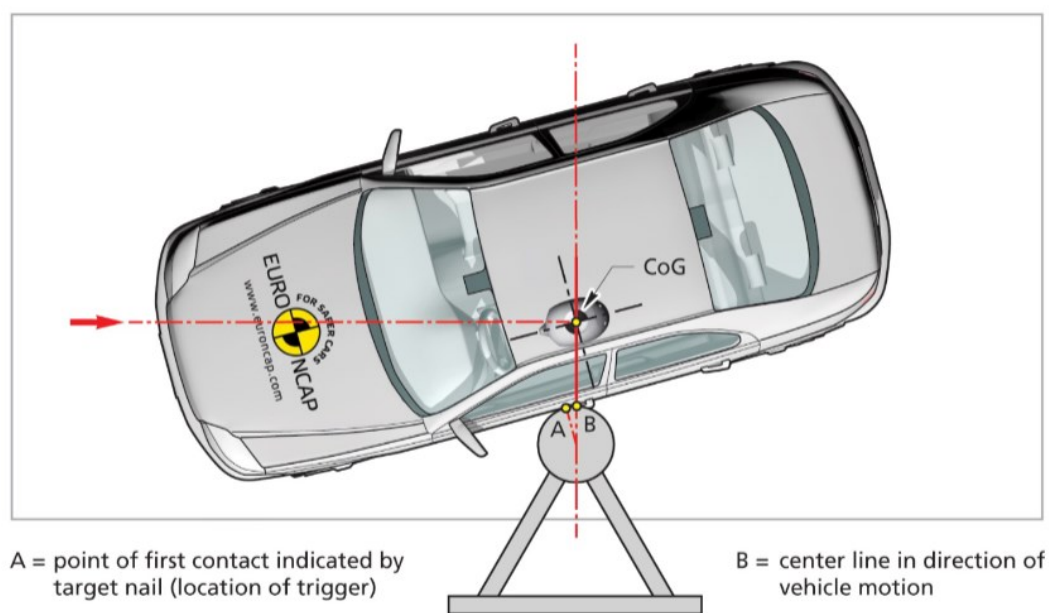
Slika 11. Oštećenje vozila 1, bočni udar [5]



Slika 12. Oštećenje vozila 2, bočni udar [5]

1.1.3 Bočni udar – nepomični stup

Neki bočni sudari rezultat su gubitka kontrole vozila koja zatim nekontrolirano bočno kližu prema krutom objektu pokraj ceste, kao što su primjerice stupovi ili drveća. Takve nesreće često imaju značajne posljedice i često su rezultati istih smrtnih ishoda ili ozbiljne tjelesne ozljede. U Euro NCAP-ovom testu bočnog udara testno vozilo je pod malo manjim kutom od pravoga bočno voženo brzinom 32 km/h prema krutom uskom stupu. Ukoliko je vozilo opremljeno središnjim zračnim jastukom koji štiti putnike od međusobnog udaranja jedne u druge, dvije muške lutke smještene su na prednja sjedala. Ukoliko nema središnjeg zračnog jastuka, jedna lutka postavljena je samo na vozačevo sjedalo. Slika 13. pokazuje shematski prikaz testa.



Slika 13. Shematski prikaz testa bočni udar u nepomični stup [4]

Ovim testom ispituje se mogućnost vozila da zaštiti glavu vozača. Kako je područje opterećenja vozila prilikom udara lokalizirano, deformacije mogu biti značajne i stup može prodrijeti duboko u putnički prostor. Bez dovoljno učinkovite zaštite, stup bi udario u glavu putnika u vozilu i rezultirao ozbiljnim ozljedama. Jedan od većih učinaka testa razvoj je boljih sustava zaštite glave putnike, odnosno zračnih jastuka za zaštitu glave koji ponekad mogu biti smješteni iznad bočnih prozora, a ponekad u samim sjedalima. Slika 14. i slika 15. prikazuju deformaciju automobila nakon provedenog testa.



Slika 14. Prikaz oštećenja nosive strukture vozila 1, bočni udar u stup [5]



Slika 15. Prikaz oštećenja nosive strukture vozila 2, bočni udar u stup [5]

1.1.4 Ostali testovi

Osim gore navedenih, Euro NCAP provodi još testova koji nisu usko vezani za samu nosivu strukturu vozila. Jedan od njih je dalji bočni udar (engl. *far side impact*) čija je svrha zaštita putnika na strani suprotnoj od one koju je zahvatio udar. Vozilo je u ovome testu montirano na postolje koje replicira deceleraciju vozila sličnu onoj prilikom bočnog udara. Idući sličan test je *whiplash* test kod kojega se testira sjedalo i sigurnosti pojas vozila prilikom stražnjeg udara u vozilo. Sjedalo se testira izvan samog testiranog automobila, na testnom postolju. Valja spomenuti još i testove udara pješaka, testove sustava pomoći vozaču kao što je primjerice autonomno kočenje, no kako se ti testovi direktno ne tiču teme rada, njih se neće pobliže opisivati.

1.2 IIHS

IIHS (engl. *Insurance Institute for Highway Safety*) nezavisna je i neprofitna organizacija osnovana 1959. od strane tri najznačajnije osiguravajuće udruge u SAD-u. U počecima, glavna svrha instituta bila je podržavanje sigurnosnih akcija drugih, no desetljeće kasnije, IIHS postaje nezavisna istraživačka udruga. Glavni cilj Instituta je smanjenje smrtnosti, ozljeda i štete uzrokovane sudarima motornih vozila pomoću istraživanje i evaluacije i edukaciju potrošača, vlasti i sigurnosnih stručnjaka. Slika 16. prikazuje logo organizacije.



Slika 16. Logo organizacije IIHS [6]

IIHS procjenjuje sigurnost vozila u sudaru pomoću pet *crash* testova: prednji udar sa srednjim preklapanjem (engl. *moderate overlap front*), prednji udar s malim preklapanjem na strani vozača (engl. *driver-side small overlap front*), prednji udar s malim preklapanjem na strani suvozača (engl. *passenger-side small overlap front*), bočni udar (engl. *side impact*) i čvrstoća krova. Također, kao i kod Euro NCAP-a evaluiraju se i putnička sjedala, autonomni sustavi pomoći vozaču pa čak i sustavi svjetala. U radu je detaljniji pogled frontalnih i bočnih testova IIHS-a.

1.2.1 Frontalni testovi

Za razliku od Euro NCAP-a, kod IIHS provode se samo frontalni testovi s preklapanjem, izostaje test gdje vozilo cijelom prednjom širinom udara barijeru. Kako u ovakvim slučajevima manja površina vozila mora na sebe preuzeti jednaku energiju udara, može se reći da se radi o zahtjevnijim slučajevima ispitivanja. Slika 17. prikazuje kratki pregled frontalnih testova koje provodi IIHS.



Moderate overlap frontal test configuration



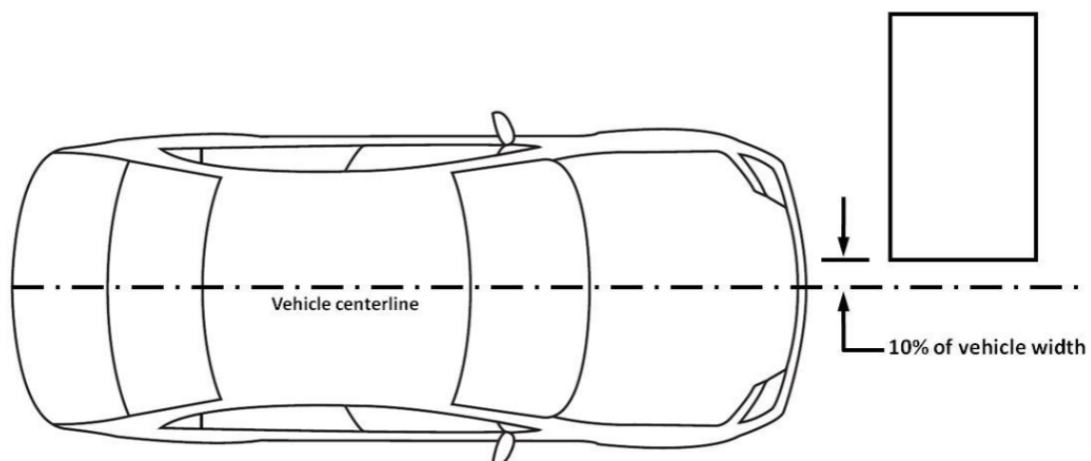
Driver-side small overlap frontal test configuration



Passenger-side small overlap frontal test configuration

Slika 17. Frontalni testovi IIHS-a [6]

Moderate overlap frontal crash test provodi se izvodí se pri brzini 64,4 km/h sa 40 % prekrivanja prednje površine automobila. Testirano vozilo ubrzano je u fiksnu deformabilnu barijeru. Na vozačkom sjedalu smještena je lutka veličine prosječne muške osobe, a na stražnjem manja dječja lutka. Ideja testa je simulirati frontalni sudar dvaju vozila slične visine, kod kojih se oba kreću brzinom približno jednakom onom na testu. Slika 18. prikazuje shematski prikaz testa.



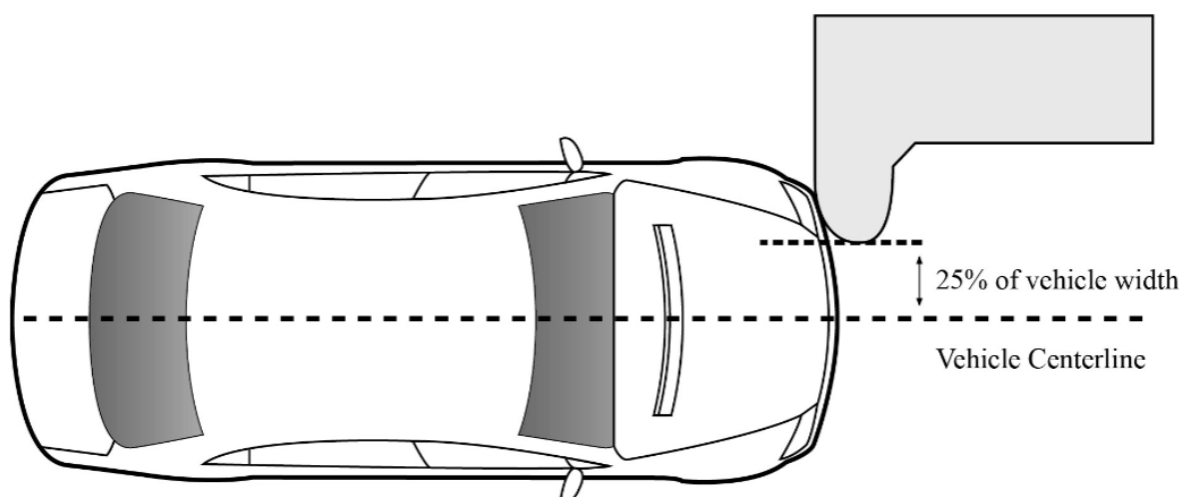
Slika 18. Shematski prikaz testa prednji udar sa srednjim preklapanjem [6]

Slika 19. pokazuje tipične deformacije nosive strukture vozila nastale ovim testom:



Slika 19. Deformacije nosive strukture kod testa prednji udar sa srednjim preklapanjem [6]

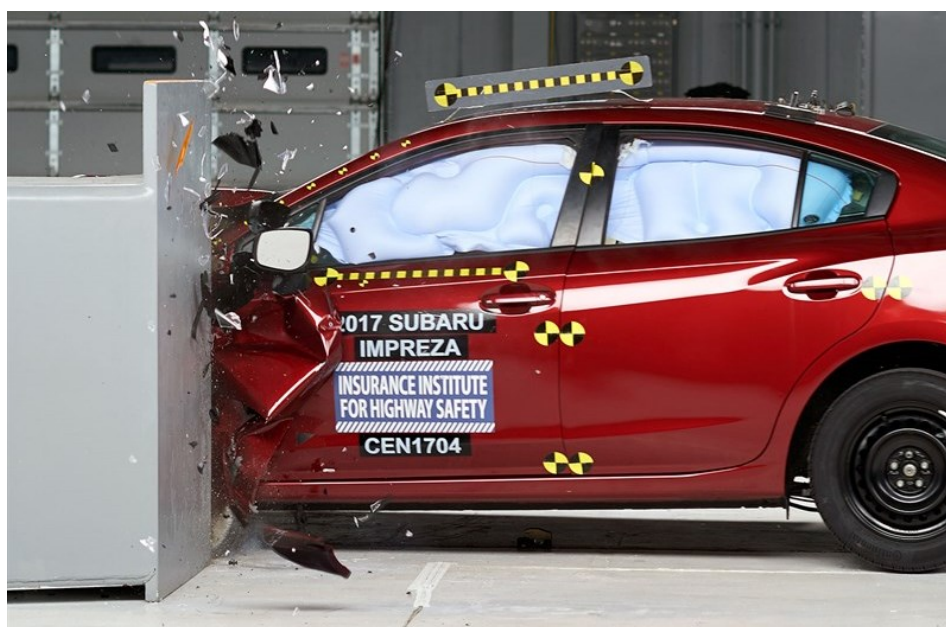
Možda i najrigorozniji *crash test* koji se trenutno provodi na svijetu IIHS-ov je *driver-side small overlap frontal test*. Test je zamišljen kao simulacija udara prednjeg lijevog dijela vozila u drugo vozilo ili neki objekt kao što je drvo ili rasvjetni stup. Test predstavlja veliki izazov nekim izvedbama sigurnosnih pojaseva i zračnih jastuka jer se putnici prilikom sudara kreću i prema naprijed, i prema bočnoj strani vozila. Prilikom testa, vozilo je ubrzano i brzinom 64,4 km/h a sa samo 25 % širine prednjeg dijela vozila udara u čvrstu barijeru. Lutka koja predstavlja odraslu mušku osobu smještena je na vozačkom sjedalo. Slika 20. pokazuje shematski prikaz testa



Slika 20. Shematski prikaz *driver-side small overlap* testa [6]

Većina modernih vozila posjeduju nosivu strukturu konstruiranu kako bi mogla izdržati frontalne udara i udara s velikim preklapanjem s malim deformacijama putničkog prostora, s obzirom da zone deformacije preuzimaju energiju sudara. Većina zona deformacija smještena je unutar srednjih 50 % prednjeg dijela vozila [6]. Kada vozilo sudjeluje u sudaru s tim dijelom prednjeg dijela, putnici su adekvatnije zaštićeni od prodiranja u putnički prostor, a prednji zračni jastuci i sigurnosni pojasevi mogu učinkovitije zaštititi putnike.

Sudari s malim preklapanjem pretežno utječu na vanjske rubova vozila, koji nisu tako dobro zaštićeni zonama deformacije. Sile sudara prenose se direktno na prednji kotač, dijelove ovjesa i vatrozid. Prednji kotač može biti poguran prema prostoru za noge putnika i na taj način može još više sudjelovati u prodiranju u putnički prostor i rezultirati ozbiljnim ozljedama nogu putnika. Kako bi pružao adekvatnu zaštitu u ovakvim sudarima, sigurnosni kavez mora moći preuzeti sile koje nisu zone deformacije ne mogu preuzeti. Jedna od mjera pomoći prilikom konstruiranja vozila je i proširenje tih zone deformacije. Slika 21 i slika 22. prikazuju deformaciju nosive strukture vozila.



Slika 21. *Small overlap test*, oštećenje 1 [7]



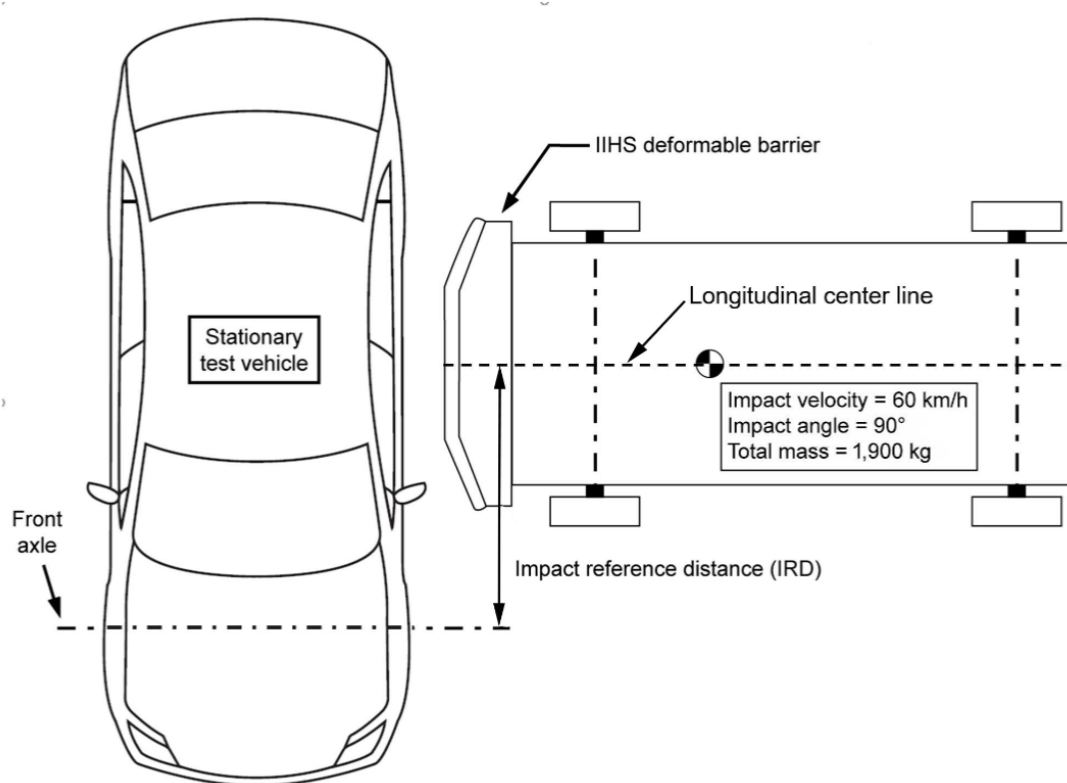
Slika 22. *Small overlap test, oštećenje 2* [7]

Kako bi se ocijenilo ponašanje strukture vozila, mjeri se iznos prodiranja u putnički prostor na ključnim lokacijama u interijeru i eksterijeru vozila nakon sudara. Količina i raspodjela točaka prodiranja pokazuje koliko dobro je prednja zona deformacije raspodijelila energiju udara, te koliko dobro je sigurnosni kavez izdržao udar.

Također, IIHS provodi jednak test i za suvozačku stranu vozila. Naime, kako su proizvođači počeli ostvarivati bolje ocjene u *driver-side small overlap* testu, u IIHS-u su primijetili da se ista poboljšanja nisu prenijela i na suvozačku stranu. Jedina prava razlika između ova dva testa, je da su u *passenger-side small overlap* testu dvije testne lutke na prednjim sjedalima.

1.2.2 Bočni test

Test koristi barijeru tešku 1905 kg koja brzinom 60 km/h udara u bočni dio vozila. Dizajn barijere replicira prednji dio vozila koje udara u testirano. Time je postignuto da se barijera deformira oko B-stupa testiranog vozila čime rubni dijelovi barijere dublje ulaze u prednja i stražnja bočna vrata vozila, čime je putnički prostor ugrožen kao u pravom sudaru dvaju vozila. Lutka veličine prosječne odrasle ženske osobe smještene su na vozačkom i stražnjem sjedalu vozila. Slika 23. prikazuje shematski prikaz testa.



Slika 23. Shematski prikaz IIHS-ovog bočnog testa [6]

Inženjeri ocjenjuju ponašanje nosive strukture vozila mjerenjem prodiranja u putnički prostor oko B-stupa. Jedan dio prodiranja neizbježan je prilikom jačih bočnih udara, no putnički prostor svejedno ne smije biti previše kompromitiran. Slika 24. i slika 25. pokazuju tipična oštećenja na nosivu strukturu vozila.



Slika 24. Oštećenje strukture vozila kod bočnog testa [7]



Slika 25. Oštećenje strukture vozila kod bočnog testa [7]

2. Odabir testova za nastavak rada

U ovome poglavlju odabrati će se dva testa od dosada opisanih, jedan frontalni i jedan bočni, te će se za oba testa provesti proračun energije koju je potrebno apsorbirati prilikom sudara. Kako su testovi američkog IIHS-a, te europskog Euro NCAP-a smatrani najnaprednijima na svijetu, odabrati će se po jedan test svake od tih dviju organizacija. Proračun sadržava izračun energije i sile sudara.

Odabrani frontalni test je Euro NCAP-ov test sudara s pokretnom progresivno deformabilnom barijerom (MPDB), dok je za bočni test odabran IIHS-ov test bočnog udara. Oba testa razvijena su u proteklih nekoliko godina kako bi što bolje simulirala stvarni sudar dvaju vozila na cesti. Zajednička karakteristika ovih testova je da u oba testa u testno vozilo udara pokretna barijera, a ne vozilo u statičku barijeru

2.1 Frontalni udar – izračun energije i sile

Kako je već napisano u poglavlju, u Euro NCAP-ovom MPDB testu, i barijera i testirano vozilo putuju brzinom 50 km/h. Barijera ima masu $m_b = 1400$ kg, a s obzirom na to da je u poglavlju o Euro NCAP-u kao primjer bilo korišteno vozilo Audi A3 koje je i samo približno te mase, za potrebe proračuna će se masu vozila isto smatrati $m_v = 1400$ kg. Izračun kinetičke energije frontalnog testa E_{kF} sastoji se od kinetičke energije vozila E_{kFV} , izraz (2), i kinetičke energije pokretne barijere E_{kFB} , izraz (3), te se računa prema jednadžbi (4).

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (1)$$

Uvrštavanjem navedenih vrijednosti u (1) dobiva se vrijednost kinetičke energije vozila (2) i barijere (3):

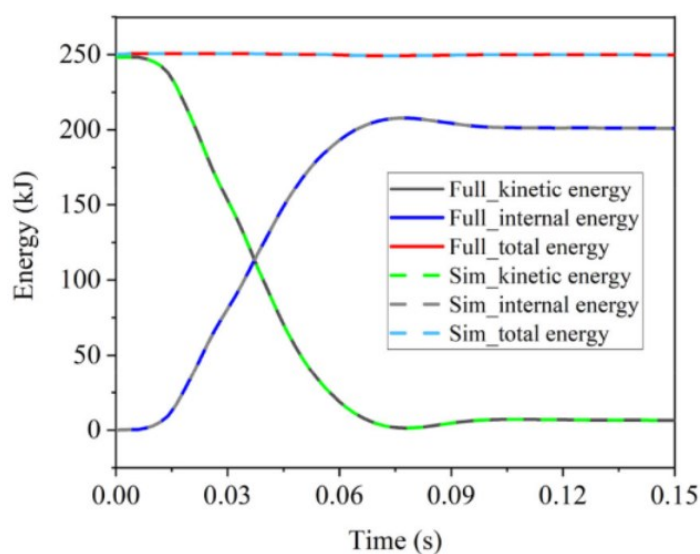
$$E_{kFV} = \frac{1}{2} \cdot m_v \cdot v^2 = 135 \text{ kJ} \quad (2)$$

$$E_{kFB} = \frac{1}{2} \cdot m_B \cdot v^2 = 135 \text{ kJ} \quad (3)$$

Ukupna kinetička energija frontalnog udara E_{kF} zbroj je iznosa kinetičkih energija vozila E_{kFV} i barijere E_{kFB} (4).

$$E_{kF} = E_{kFV} + E_{kFB} = 270 \text{ kJ} \quad (4)$$

U radu [15] prezentiran je pojednostavljeni model izračuna energije, akceleracije i brzine pojedinih dijelova osobnog vozila tijekom sudara s barijerom brzinom 50 km/h s 50% preklapanja. Također, u radu je provedena usporedba rezultata pojednostavljenog i cjelovitog modela vozila. Slika 26. prikazuje usporedbu vrijednosti kinetičkih sila oba modela proračuna iz [15]. Same razlike unutar modela neće biti od veće važnosti za ovaj rad, no pogledom na dobivene vrijednosti na slici 26., može se zaključiti da je vrijednost iz (4) ispravnog reda veličine te da vrijednost izračunata u (4) predstavlja vršnu vrijednost kinetičke energije.



Slika 26. Vrijednosti kinetičke energije [15]

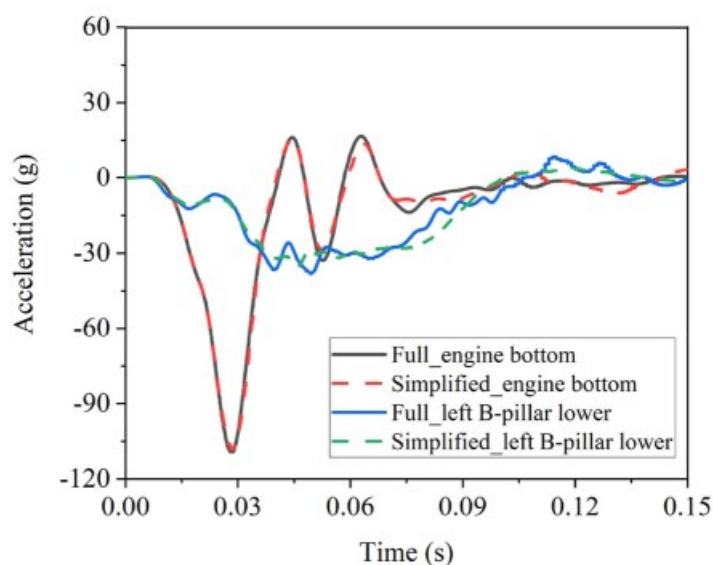
Izjednači li se rad sile na duljini x_F s ukupnim zbrojem kinetičkih energija, može se izračunati prosječan iznos sile udara (5).

$$F_{avgF} \cdot x_F = E_{kF} \quad (5)$$

Kako je duljina x_F nepoznata, potrebno ju je pretpostaviti. Pogledom na slike iz poglavlja 1.1.1. i okvirnim poznavanjem duljine vozila, može se pretpostaviti da se vozilo i barijera otprilike deformiraju 0,8 m svaki, čime ukupna duljina djelovanja sile x_F iznosi 1,6 m. Uvrštavanjem brojeva u (5) dobije se iznos prosječne sile frontalnog udara F_{avgF} (6).

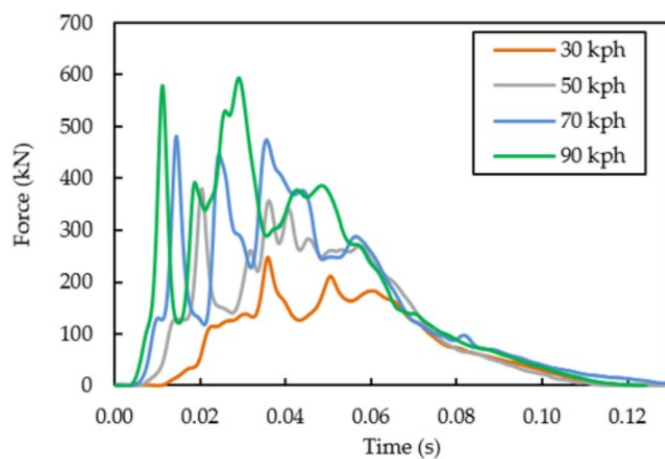
$$F_{avgF} = 169 \text{ kN} \quad (6)$$

Sila izračunata u (6) predstavlja prosječnu vrijednost sile koja djeluje na vozilo tijekom udara. Naime, kako prikazuje slika 27., akceleracija, a samim time i sila koja djeluje na vozilo imaju više vršnih vrijednosti koje se ovakvim pojednostavljenim modelima ne mogu izračunati.



Slika 27. Dijagram promjene akceleracije vozila tijekom frontalnog udara [15]

Također, u [21] predstavljen je model analize sudara vozila L7 kategorije, ukupne mase 790 kg. Slika 28. prikazuje raspodjelu sila prilikom frontalnog udara u čvrstu barijeru (zid) s 50 % preklapanjem. Same vrijednosti manje su nego one izračunate u ovome radu zbog same razlike masa vozila korištenih u izračunu, no korisno je vidjeti samu raspodjelu sila tijekom udara. Kao i akceleracija, vrijednosti sile imaju mnogo vršnih vrijednosti koje se ovim jednostavnim modelima ne mogu izračunati. Može se izračunati samo prosječna vrijednost F_{avg} .



Slika 28. Raspodjela sile tijekom frontalnog udara [21]

2.2 Bočni udar - izračun energije i sile

Jednakim načinom kako je proveden izračun za frontalni udar, proveden je i za bočni udar. Jedina razlika ovih dvaju proračuna je da je kinetička energija vozila kod bočnog udara, s obzirom da je testirano vozilo u IIHS-ovom bočnom testu statično, jednaka nuli. Razmatra se barijera mase $m_{bB} = 1905$ kg koja testirano vozilo udara brzinom $v_B = 60$ km/h. Kinetička energija udara tada prema (1) iznosi

$$E_{kB} = \frac{1}{2} m_{bB} \cdot v_B^2 = 265 \text{ kJ} \quad (7)$$

Također, usporedimo li rezultate sa slike 26., vidimo da je vrijednost kinetičke energije iz (7) ispravnog reda veličine. Kako je duljina deformacije x_B i kod bočnog udara nepoznata, potrebno ju je ponovno pretpostaviti. Poblжим pogledom slika deformiranih vozila iz poglavlja 1.1.6., može se pretpostaviti da se i testirano vozilo i barijera deformiraju za otprilike 0,4 m, čime ukupan put djelovanja sile x_B iznosi 0,8 m. Uvrštavanjem vrijednosti u (8) dobije se prosječan iznos sile bočnog udara F_{avgB} (9).

$$F_{avgB} \cdot x_B = E_{kB} \quad (8)$$

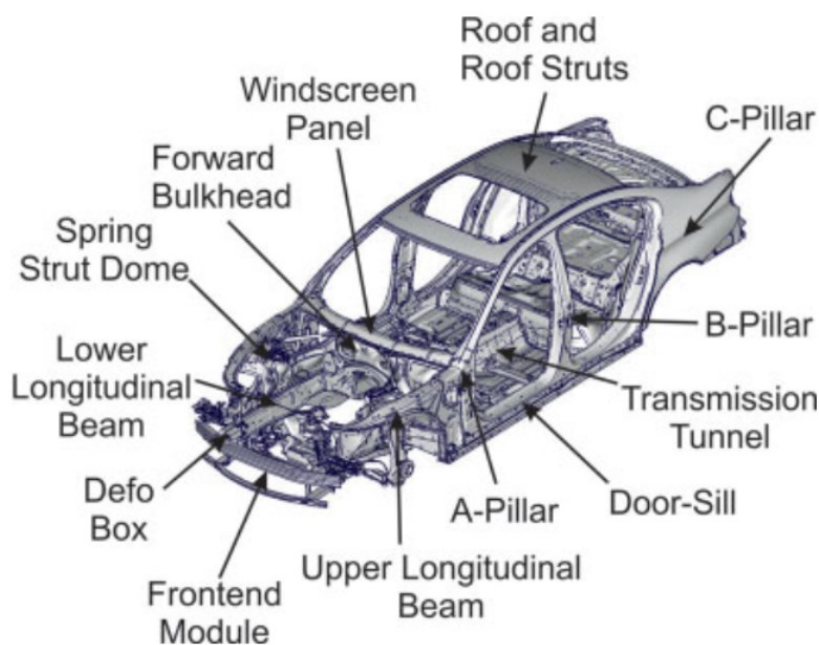
$$F_{avgB} = 331 \text{ kN} \quad (9)$$

Isto kao i u prošlom poglavlju, pogledom na sliku 26. i sliku 28., može se zaključiti da su izračunate vrijednosti i za bočni udar otprilike ispravnog reda veličine,

3. Pregled postojećih rješenja

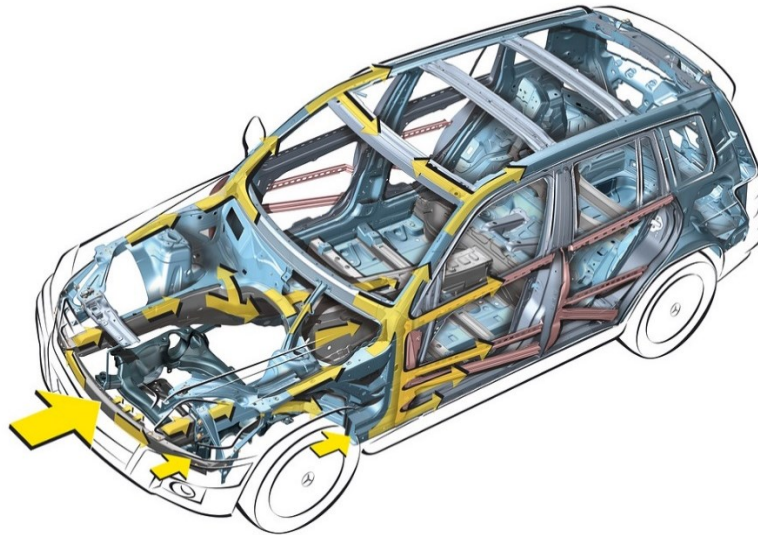
3.1 BIW

U ovom odlomku napravljen je kratki pregled postojećih rješenja BIW-a koje proizvođači koriste u svojim modelima. Termin BIW kratica je za engleski *body in white*, i označuje golu strukturu vozila, bez pogonskih elemenata, elemenata ovjesa ili bilo kakvih drugih dijelova koji nisu nosivi dijelovi karoserije. Slika 29. prikazuje pregled osnovnih elemenata BIW-a, a elementi koji su pobliže vezani uz temu ovog rada uključuju: A-stup (engl. *A-pillar*), B-stup (engl. *B-pillar*), središnji tunel mjenjača (engl. *transmission tunnel*), prag vrata (engl. *door sill*), prednja pregrada/vatrozid (engl. *front bulkhead/firewall*), pregrada vjetrobranskog stakla (engl. *windscreen panel*), elementi krova (engl. *roof struts*), donja i gornja uzdužna greda (engl. *lower/upper longitudinal beam*), te prednja *crash* struktura (engl. *crash/defo box + frontend module*).



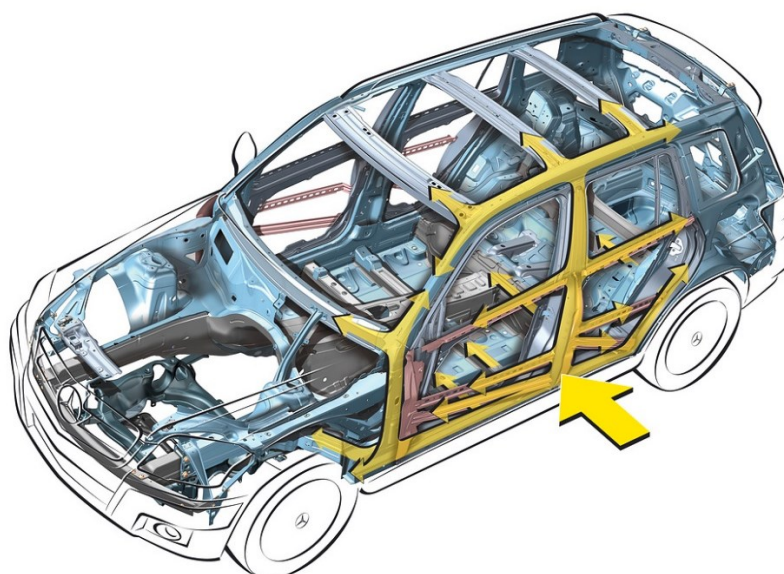
Slika 29. Pregled osnovnih dijelova BIW [1]

Slika 30. i slika 31. prikazuju tok sila kroz elemente BIW-a kod frontalnog i bočnog udara. Na obje slike može se vidjeti da je raspored elemenata BIW-a takav da odvodi opterećenje udara što je moguće dalje od putnika.



Slika 30. Prikaz toka sila kod frontalnog udara [17]

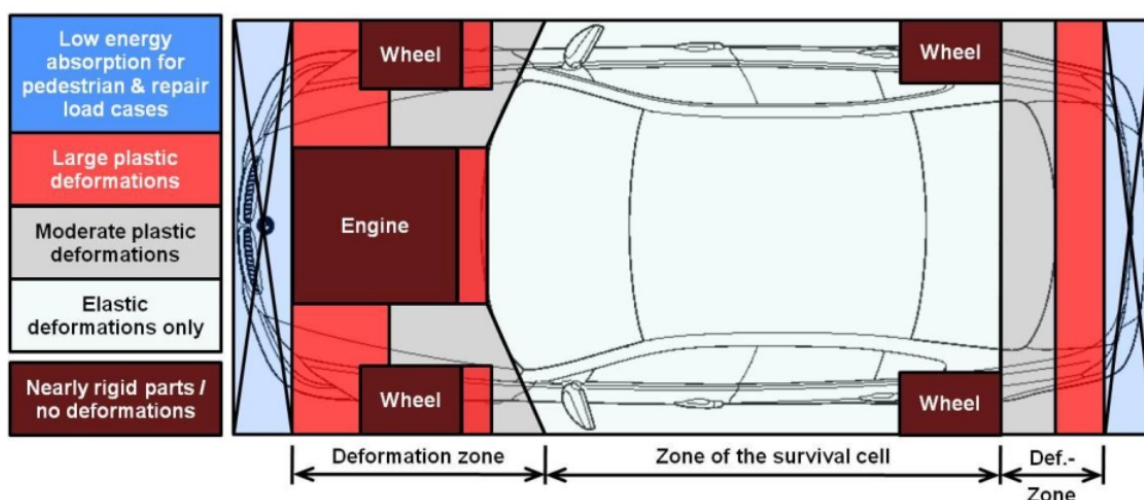
Kod frontalnog udara, zadatak prednje deformacijske strukture je apsorpiranje jednog dijela te prenošenje energije prema A-stupu pomoću gređa koje povezuju deformacijsku strukturu i putnički prostor. Kod bočnog udara, glavni prioritet ostaje što manja deformacija B-stupa te prenošenje energije prema okolnim elementima BIW-a.



Slika 31. Prikaz toka sila kod bočnog udara [17]

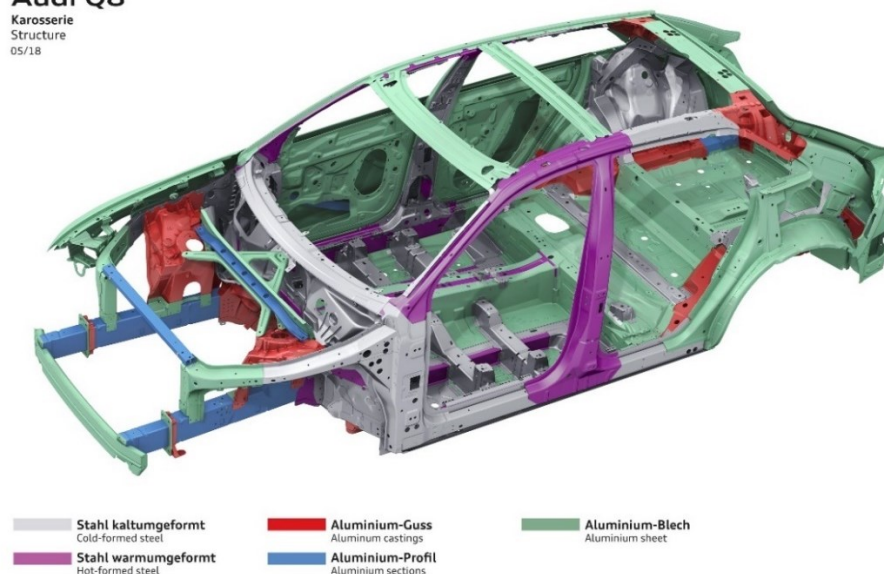
3.2 Materijali izrade

Materijal izrade pojedinih dijelova BIW-a najviše će ovisiti od same funkcije i pozicije dijela. Ukoliko se BIW podijeli na tri dijela, kako pokazuje slika 32., ta tri dijela bila bi prednja i stražnja zona deformacije (engl. *deformation zone*), te sigurnosni kavez u kojemu su smješteni putnici (engl. *passenger compartment, survival cell*).

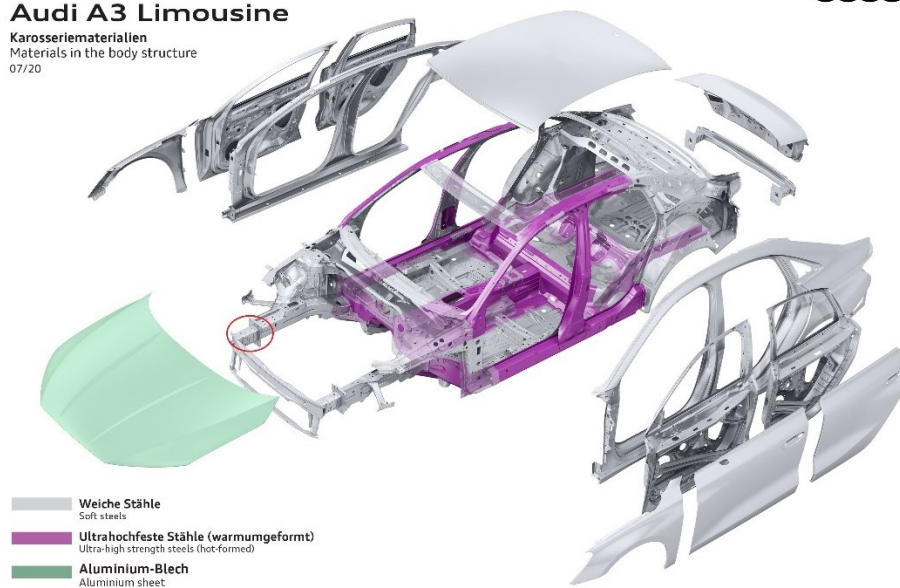


Slika 32. Prikaz podjele BIW-a na tri dijela [18]

Najvitalniji elementi sigurnosnog kaveza, točnije A i B stup, dijelovi krova te ojačanja vrata, gotovo će uvijek, i u visokoj i u nižoj klasi, biti izrađeni od vruće oblikovanih (vruće štancanje, engl. *hot stamping*) čelika visoke čvrstoće. Ostali elementi koji zatvaraju sigurnosni kavez izrađuju se od hladno oblikovanih čelika. Približavanjem zoni deformacije, prioriteta prilikom odabira materijala se mijenjaju. Dok su kod sigurnosnog kaveza vlačna čvrstoća i krutost od najveće važnosti, zona deformacije proizvođačima dozvoljava malo više slobode prilikom odabira materijala.

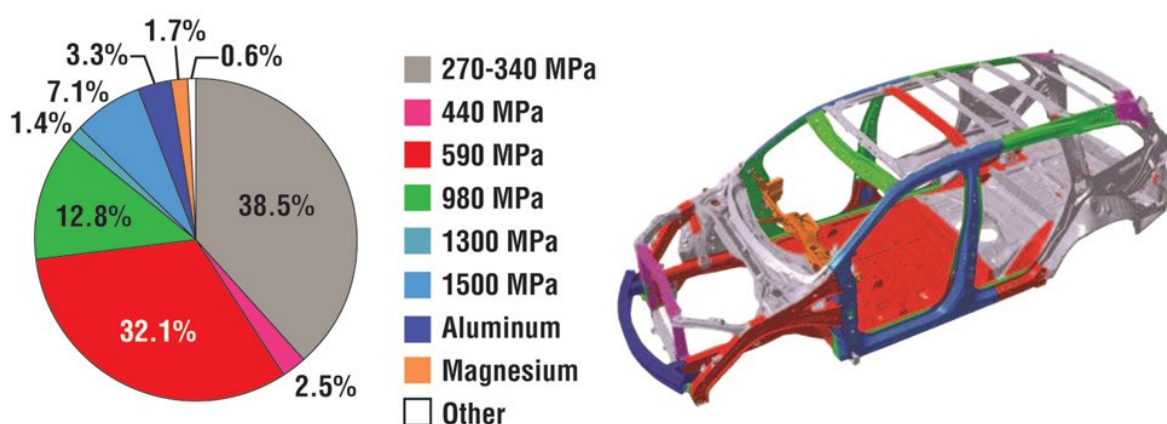
Audi Q8Karosserie
Structure
05/18**Slika 33. Korišteni materijali, model Audi Q8 [10]**

Automobili više klase će tako moći imati većinu zone deformacije izrađenu od aluminija, bilo od aluminijskog lijeva ili profila. U zonama deformacije niže klase automobila, može se primijetiti korištenje čelika niže čvrstoće. Kao primjer vozila više klase uzet je model Audi Q8, a niže klase model Audi A3. Navedene razlike vidljive su na slici 33. i slici 34

Audi A3 LimousineKarosseriematerialien
Materials in the body structure
07/20**Slika 34. Korišteni materijali, Audi A3 [10]**

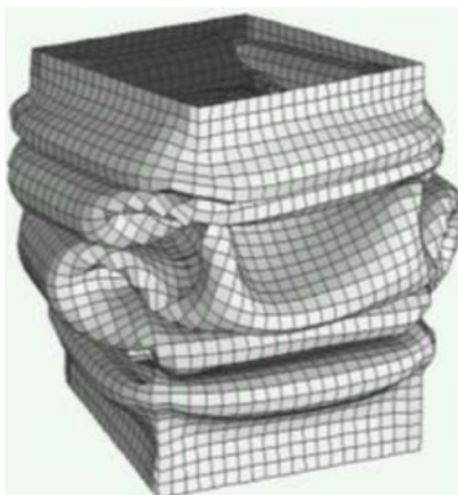
Uzmu li se u obzir i egzotični automobili najviše klase, dijelovi sigurnosnog kaveza mogu biti izrađeni i od polimera ojačanih ugljičnim vlaknima, ali i u cijelosti od karbonskih vlakana (monokok). Primjer prve je Audi R8 [10], a potonje kategorije Rimac Nevera [11].

Raspored vrijednosti vlačnih čvrstoća po elementima BIW-a, kao i udio pojedinih materijala na primjeru vozila Honda Pilot iz 2016. godine, vidljivi su na slici 35.



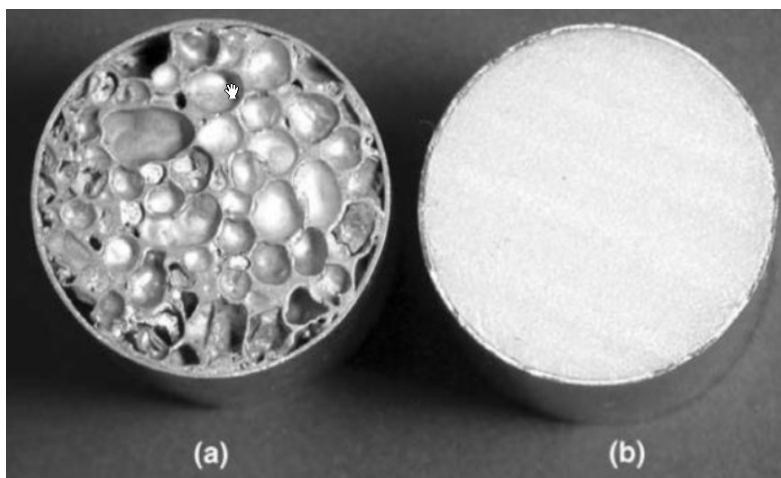
Slika 35. Prikaz vlačnih čvrstoća pojedinih elemenata BIW-a [16]

Dio BIW-a koji preuzima najviše energije udara i kod kojega se mogu pronaći najzanimljiviji poprečni presjeci naziva se *crash box*. Na slici 34. *crash box* je označen crvenim kružićem. Ugrubo, strukture od kojih se izrađuje *crash box* mogu se podijeliti u četiri skupine: metalne cijevi, metalne pjene, *lattice sandwich* metali i *honeycomb* strukture. Mogu se pronaći i kombinacije navedenih struktura, primjerice cijevi ispunjene pjenom.



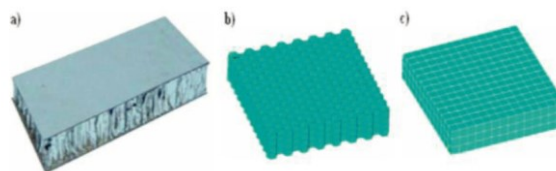
Slika 36. Simulacija deformacije cijevi [20]

Slika 36. prikazuje računalnu simulaciju deformiranja cijevi [20]. Kako bi se povećala čvrstoća cijevi *crash boxa*, koriste se kombinacije struktura (hibridne strukture) kako prikazuje slika 37.

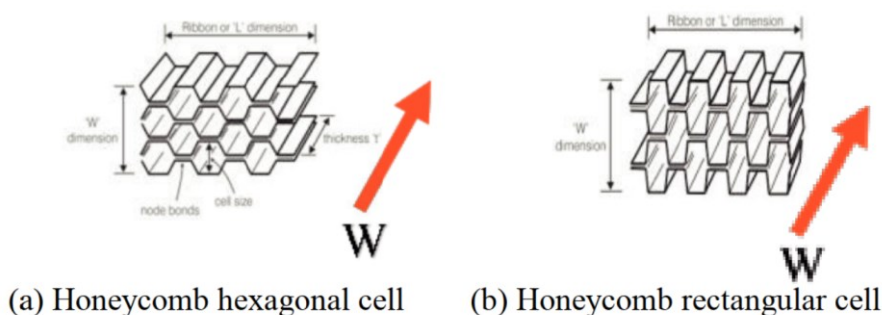


Slika 37. Primjer kombinacije struktura - cijev ispunjena metalnom (a) i polistirenskom (b) pjenom [20]

Slika 38. i slika 39. prikazuju primjere *sandwich* i *honeycomb* strutura.



Slika 38. *Sandwich* strukture [20]



(a) Honeycomb hexagonal cell

(b) Honeycomb rectangular cell

Slika 39. *Honeycomb* strukture [20]

Kako bi se dobila gruba slika o samom udjelu mase BIW-a u cijeloj masi vozila, prema [19] proveden je okvirni izračun mase BIW-a. Pomoću iduća dva izraza preuzetih iz [19] moguće je izračunati približnu vrijednost mase BIW-a u kg u ovisnosti o materijalu izrade, te duljini ($L103$), širini ($W103$), te visini ($H100$) vozila u m. Izraz (10) vrijedi za BIW izrađen pretežno od čelika, a (11) za BIW izrađen pretežno od aluminija.

$$M_{BiW} = 25,195 \cdot (L \cdot W \cdot H) \quad (10)$$

$$M_{BiW} = 18,033 \cdot (L \cdot W \cdot H) \quad (11)$$

Uvrste li se u navedene izraze približne dimenzije vozila C segmenta duljine 4,35 m, širine 1,75 m, te visine 1,5 m s BIW-om pretežno izrađenim od čelika, dobiva se vrijednost mase BIW-a približno 290 kg. Uzme li se, kao primjer vozila C segmenta, ranije spomenuti model Audi A3 sličnih dimenzija i mase 1300-1400 kg, vidi se da udio mase BIW-a u masi cijelog vozila iznosi 20-25 %.

3.3 Tehnologije povezivanja

Tehnologije povezivanja različitih elemenata BIW-a ugrubo se mogu podijeliti u tri skupine: zavari, ljepila i mehanički učvršćivači. Kao i uvijek kod odabira metode povezivanja, početno pitanje je povezuju li se materijali sličnih ili različitih svojstava. Ukoliko je riječ o povezivanju sličnih materijala, primjerice dvaju vrsta čelika ili aluminija, povezivanje može biti izvedeno zavarom ili lemom. Ukoliko se radi o različitim vrstama materijala, povezivanje će biti odrađeno nekim mehaničkim učvršćivačem, primjerice zakovicama, nitnama ili vijcima. Također, jedan od bitnih faktora prilikom odabira metode povezivanja je i sama dostupnost mjesta povezivanja [12]. Slika 40. prikazuje neke vrste mehaničkih učvršćivača i mogućnost korištenja s obzirom na dostupnost mjesta povezivanja.

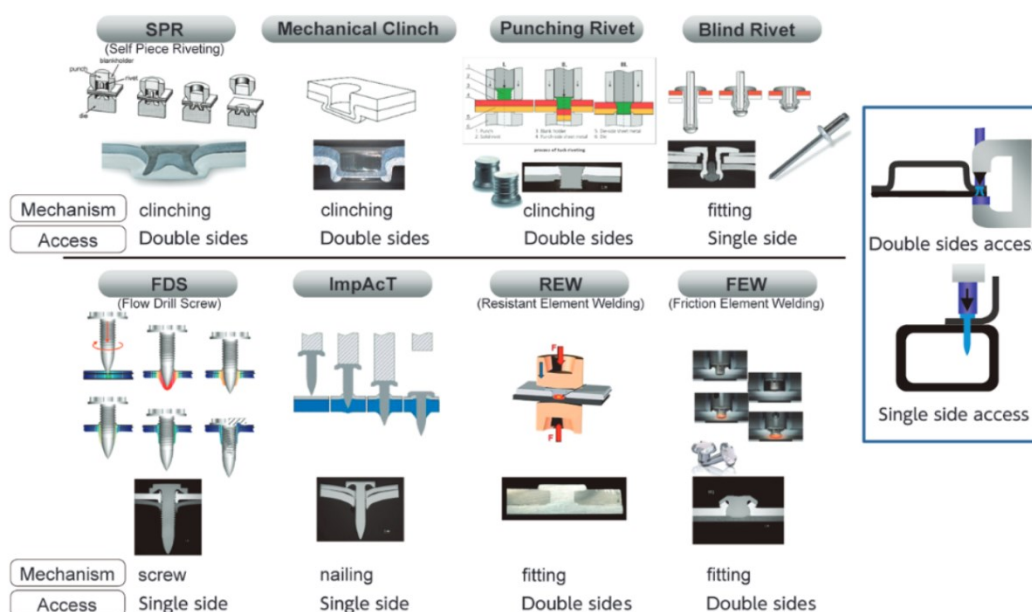
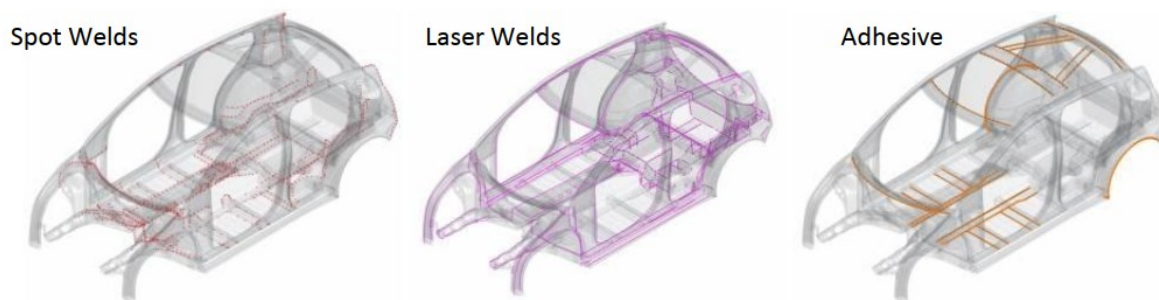


Fig. 4 Practically applied methods of joining dissimilar metals for car body structure

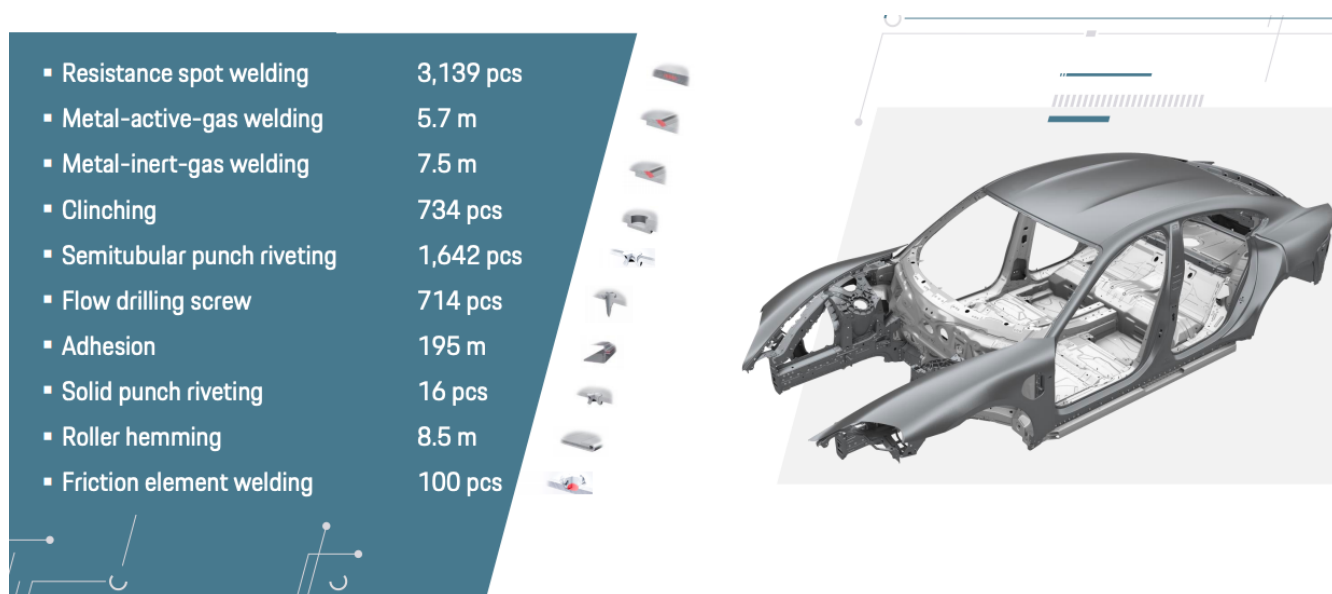
Slika 40. Primjeri mehaničkih učvršćivača [12]

Slika 41. pokazuje grubi prikaz lokacija korištenja pojedinih vrsta povezivanja. Može se uočiti da se oko sigurnosnog kaveza, odnosno mjestu gdje se pretežno koriste istovrsni čelici, uglavnom koriste zavari i ljepila za povezivanje elemenata. Odmicanjem od sigurnosnog kaveza prema zoni deformacije, kako se počinju koristiti različiti materijali, tako se i sve više i više koriste mehaničke metode povezivanja elemenata.



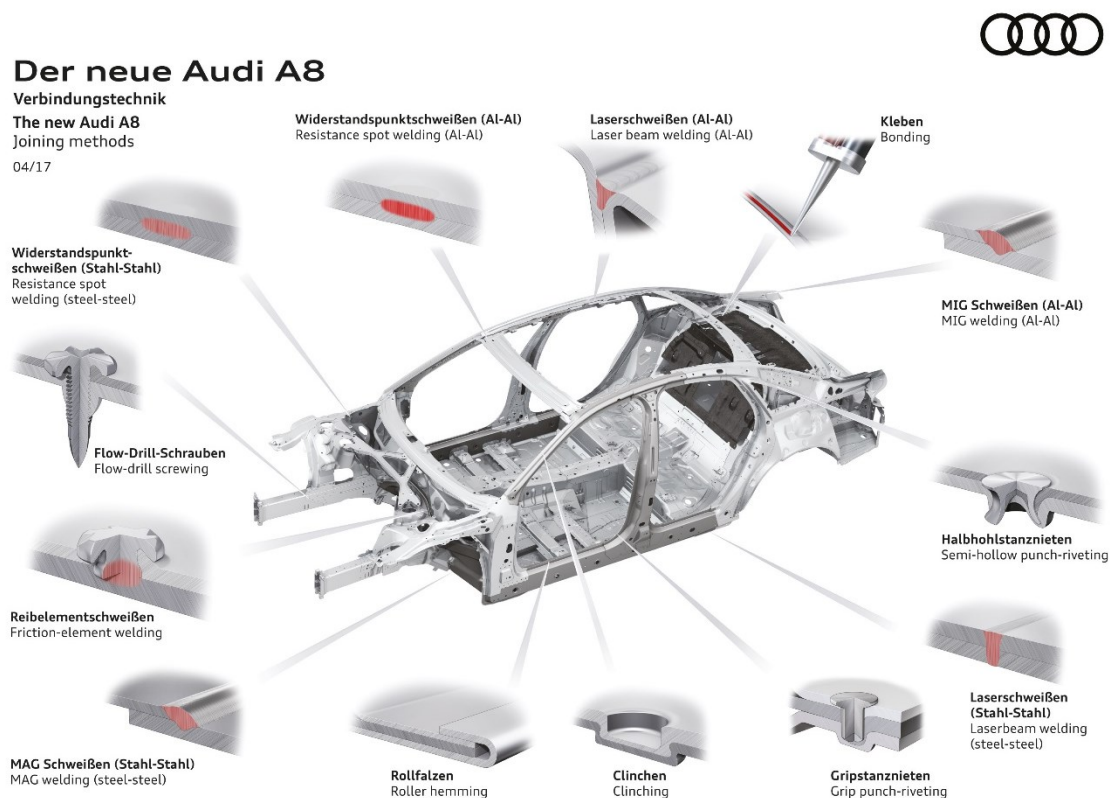
Slika 41. Grubi prikaz mjesta korištenja pojedinih vrsta povezivanja [13]

Kao primjer iz stvarnog vozila, slika 42. prikazuje vrste i količine različitih metoda povezivanja u modelu Porsche Taycan. Može se vidjeti da se u najvećoj mjeri koriste različite vrste zavarenih spojeva. Danas najčešće korištena vrsta zavarivanja, u slučajevima gdje dostupnost spoja to omogućuje, je točkasto zavarivanje. Od raznih vrsta mehaničkih učvršćivača, pretežno se koriste zakovice.



Slika 42. Prikaz metoda povezivanja korištenih u modelu Porsche Taycan [14]

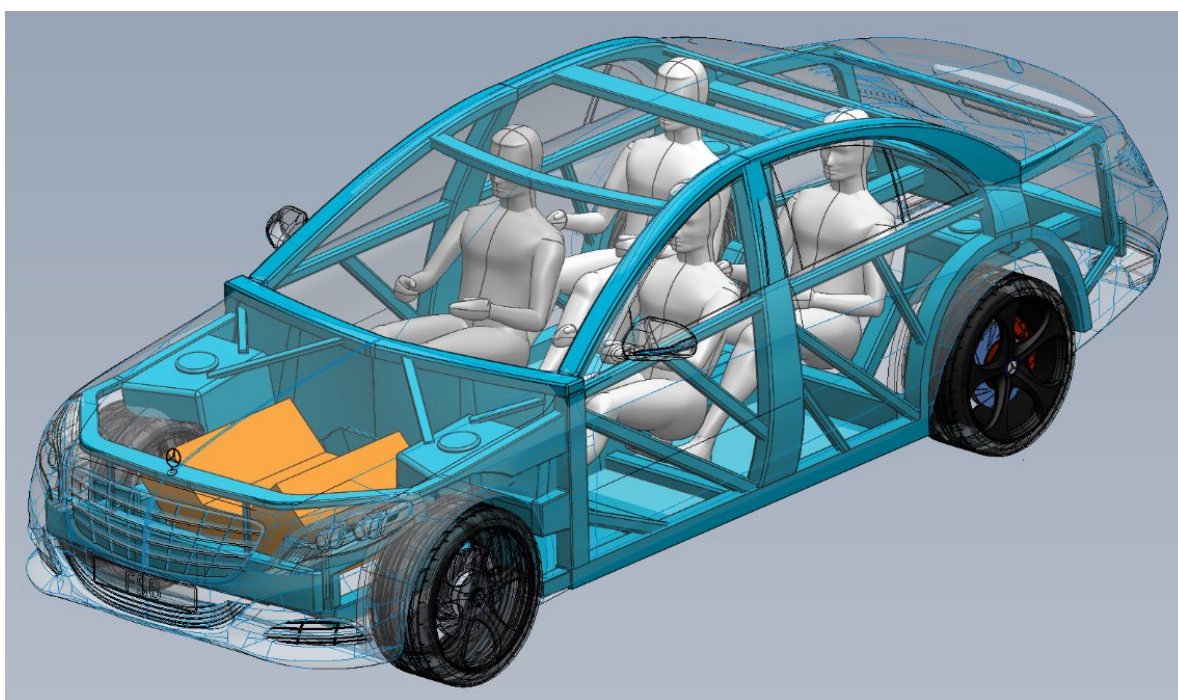
Slika 43. nešto detaljnije prikazuje same vrste povezivanja elemenata, ovoga puta na primjeru vozila Audi A8. Na ovom primjeru naznačeno je i lasersko zavarivanje čije su prednosti velika brzina procesa, mala širina zavora, mogućnost zavarivanja na teško dostupnim mjestima. Također, laserske zavare u pravilu ne treba naknadno obrađivati.



Slika 43. Prikaz metoda povezivanja korištenih u modelu Audi A8 [10]

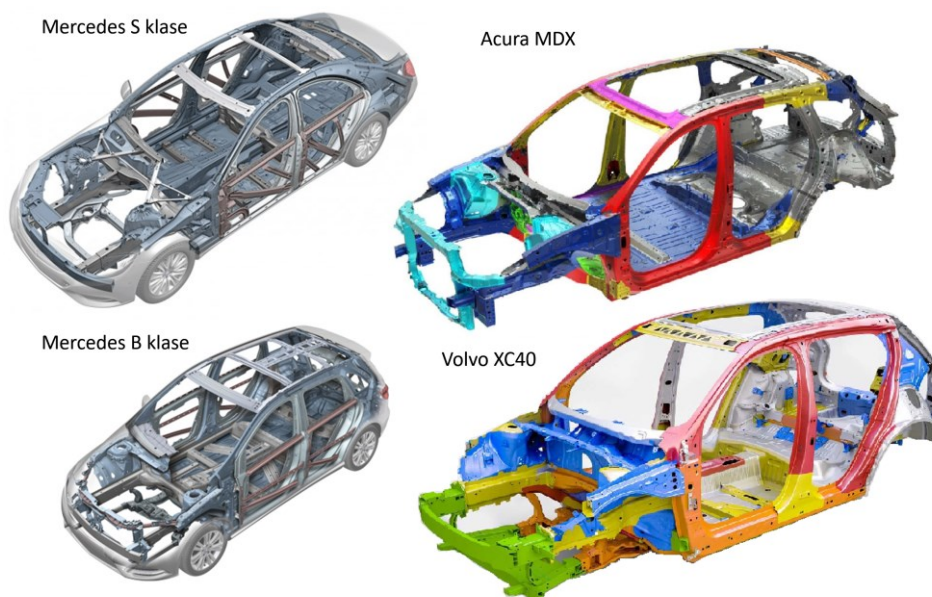
4. Modeliranje

U nastavku poglavlja napravljen je postupni pregled koraka modeliranja BIW-a unutar okvira dimenzija stvarnog vozila. Odabrani stvarni model vozila je Mercedes S klase čije su vanjske konture korištene za smještaj nosive strukture, dok su rješenja pojedinih elemenata nosive strukture napravljena prema uzorima s više različitih modela vozila, ne nužno samo Mercedes S klase. CAD model navedenog vozila preuzet je s web stranice GrabCad.com [22]. Modeliranje je rađeno u programskom paketu Solidworks. Model je napravljen proučavanjem stvarnih rješenja od kojih su neka već prikazana ranije u radu. Slika 44. prikazuje konačan model sa smještenim motorom, kotačima, putnicima i vanjskim konturama vozila.



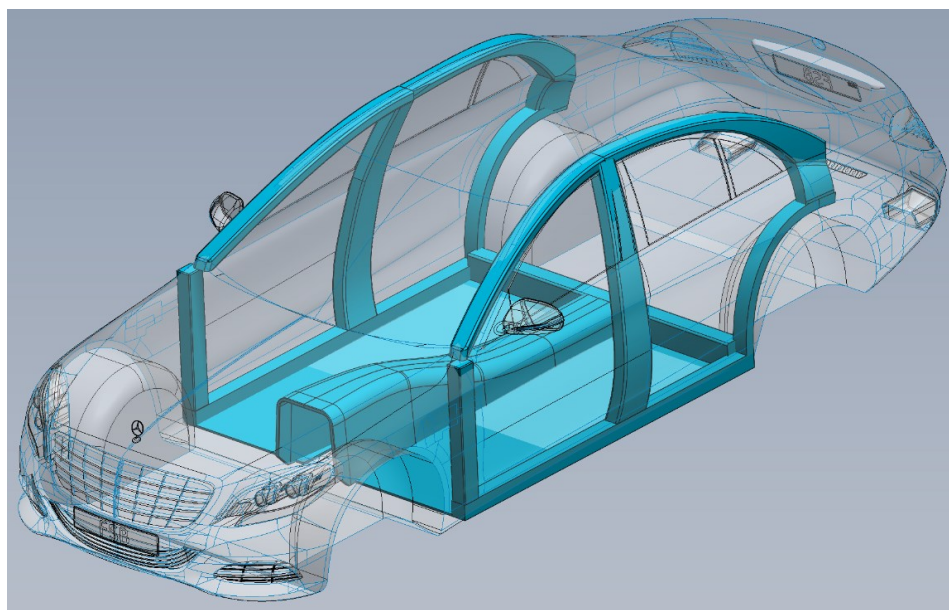
Slika 44. Konačan model BIW-a s putnicima, motorom, kotačima i konturama vozila

Na slici 45. prikazani su još neki stvarni modeli vozila koji su služili kao uzor za modeliranje. Kao uzori su korišteni i ranije spominjani modeli u radu, kao što su primjerice Audi A3 ili Porsche Taycan.



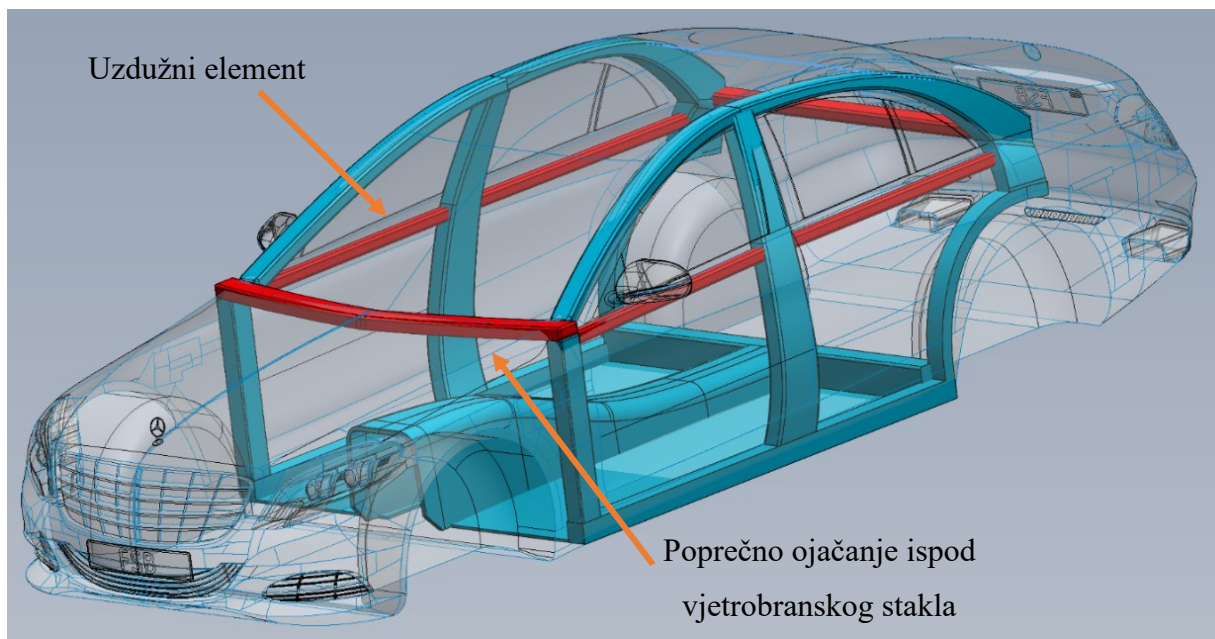
Slika 45. Stvarni uzori za model

U idućim slikama, zbog bolje preglednosti elemenata BIW-a, kotači, motor i putnici biti će skriveni, a vanjske konture vozila, koje služe kao granice za modeliranje, biti će prikazane transparentno. Novododani elementi u pojedinim slikama označeni su crvenom bojom, te su naznačeni strelicama. Samo modeliranje započinje od putničkog prostora, odn. sigurnosnog kaveza. Kao osnova za daljnju gradnju BIW-a postavljeni su A, B i C nosači, prag vrata, podnica, te središnji tunel za mjenjač i kardana. Slika 46. prikazuje osnovu za daljnje modeliranje.



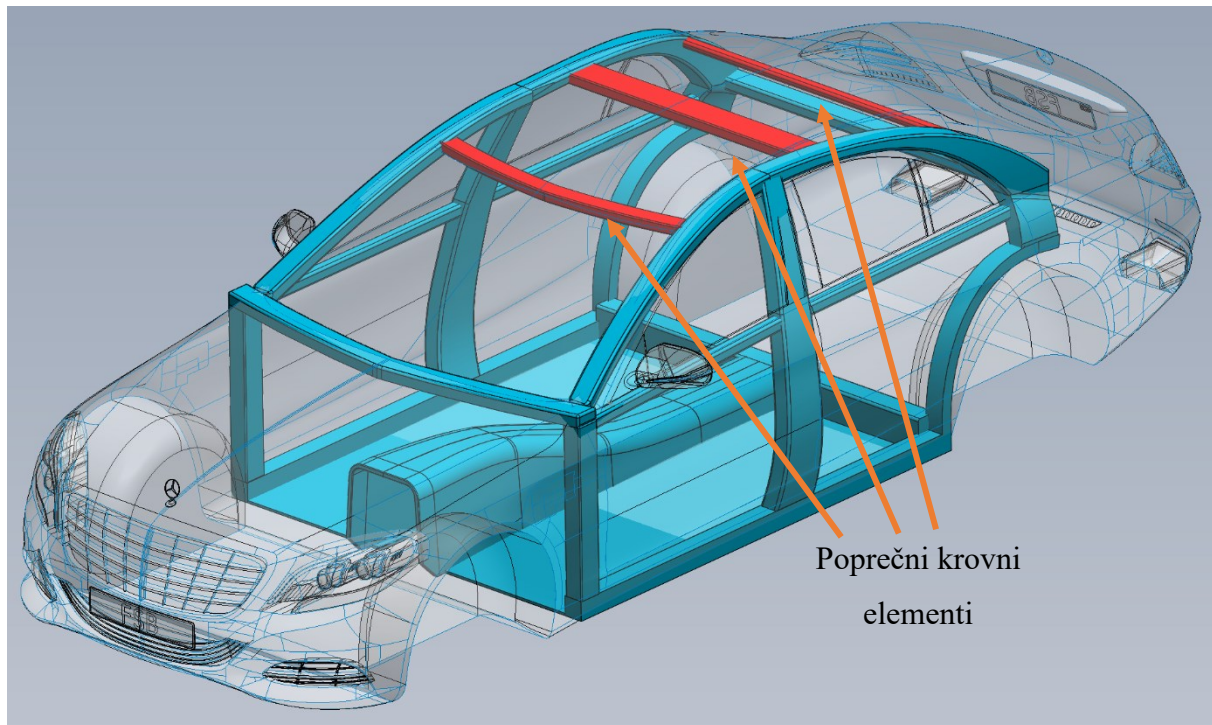
Slika 46. Osnova BIW-a za daljnje modeliranje

Prvi korak prilikom modeliranja zatvaranje je putničkog prostora. Kako vozilo mora omogućiti pogled iz vozila prema okolini, potrebno je predvidjeti mjesta za staklene površine. Na sva četvera vrata dodani su uzdužni elementi na donju stranu prozora. Poprečno ojačanje dodano je ispod vjetrobranskog stakla i ispod stražnjega stakla. Slika 47. prikazuje navedene elemente označene crvenom bojom.



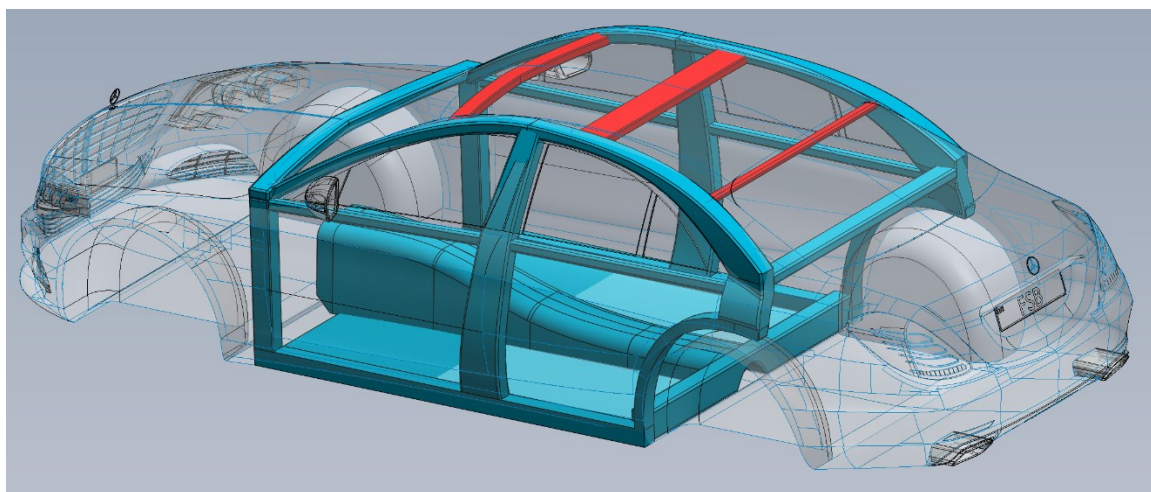
Slika 47. BIW s dodanim ojačanjima vrata i ojačanjima prednjeg i stražnjeg stakla

Prva iduća veća praznina javlja se u krovu vozila. Osim vjetrobranskog i stražnjeg stakla, dodatna dva ograničenja koja je potrebno zaobići su mogućnost eventualnog krovnog prozora (panorame), a osim toga potrebno je i ostaviti dovoljno prostora za glave putnika na stražnjim sjedalima. Uzimajući u obzir navedena ograničenja, dodana su tri poprečna krovna elementa koji međusobno spajaju A i C nosače sa svake strane vozila.



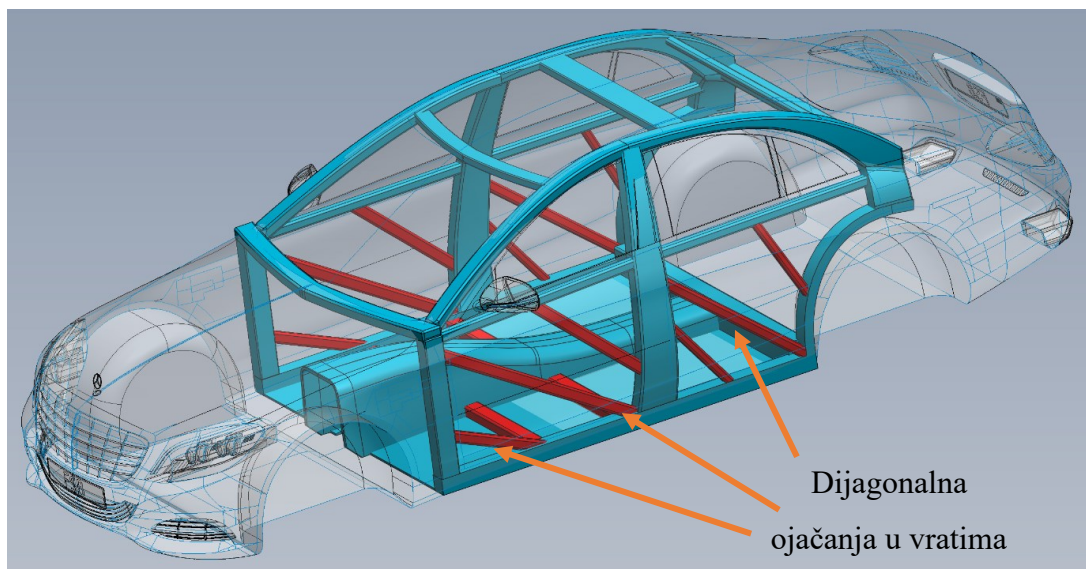
Slika 48. Nadogradnja BIW-a s krovnim elementima

Slika 48. prikazuje navedene elementa s prednjeg, a slika 49. sa stražnje strane vozila



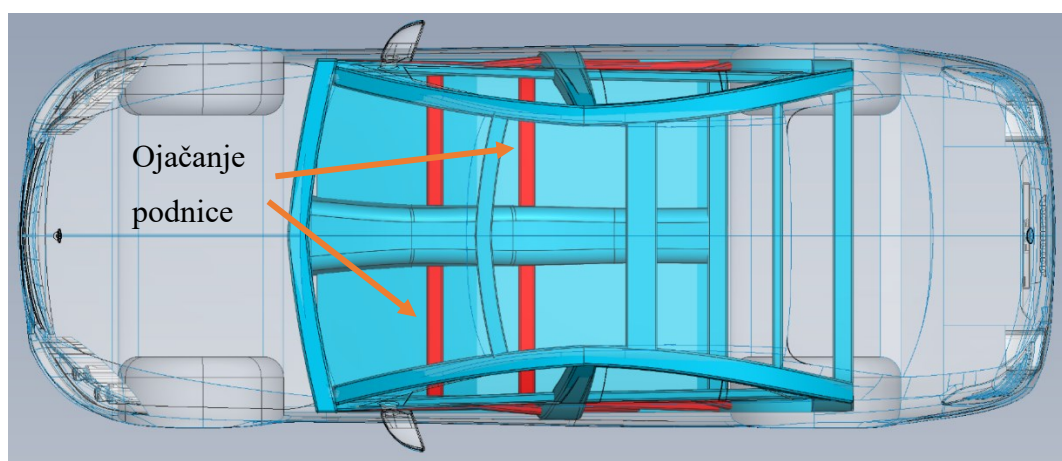
Slika 49. Nadogradnja BIW-a s krovnim elementima, stražnji pogled

Nadalje, treba ojačati podnicu i vrata. Okvir vrata trenutno predstavlja jednu od većih praznina koju je potrebno ispuniti elementima koji mogu preuzeti opterećenje. Zbog prenošenja opterećenja na obližnje elemente, o čemu će biti riječi u idućem poglavlju, ojačanja vrata postavljaju se dijagonalno na dio vrata ispod prozorskih površina.



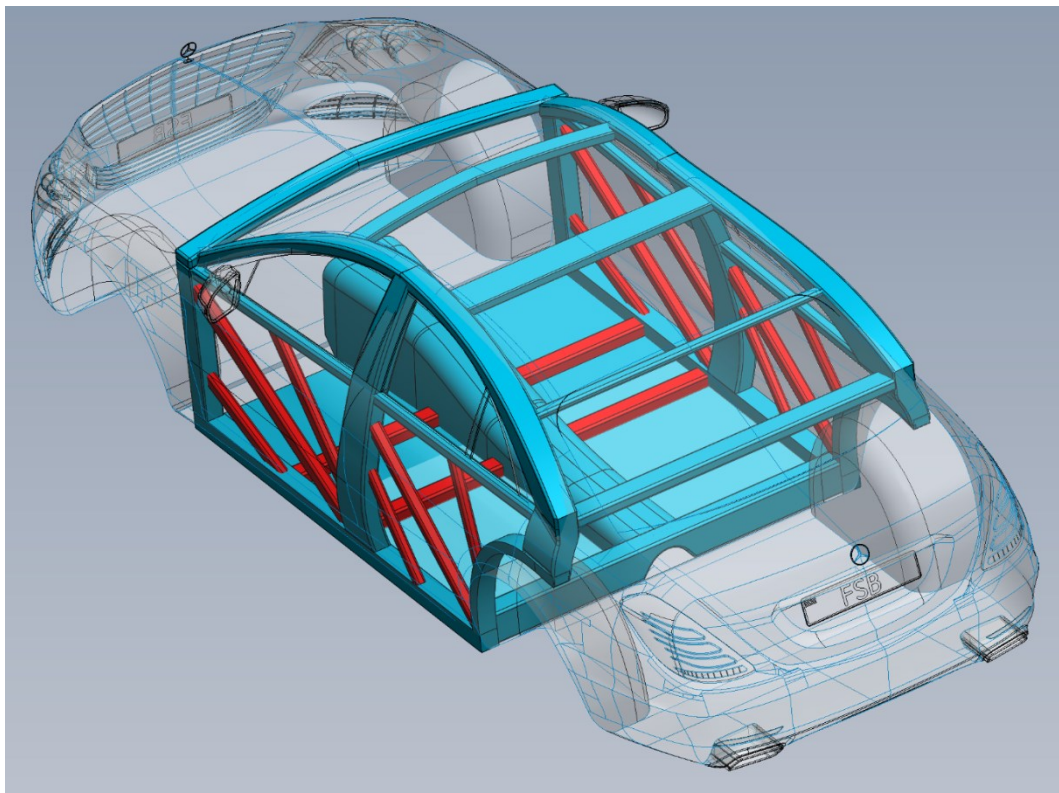
Slika 50. Nadogradnja BIW-a s elementima u vratima i podnici

Poprečni elementi u podnici preuzimaju silu tijekom bočnog udara te njihova pozicija diktira položaj i točke fiksiranja sjedala putnika. Sam položaj poprečnih elemenata položaj diktiran je zahtjevima za preuzimanje opterećenja, te zahtjevima za putnički prostor. Na slici 50. vidljivi su elementi u podnici i vratima s prednjeg pogleda, a na slici 51. elementi u podnici u tlocrtu.



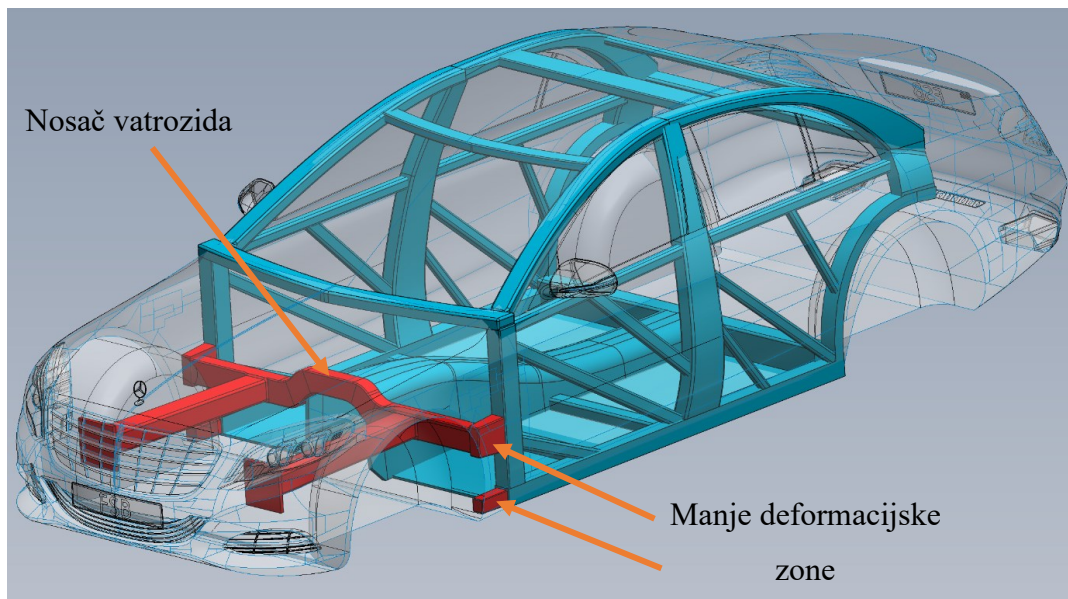
Slika 51. Pogled na ojačanja podnice u tlocrtu

Praznina s prednje strane putničkog prostora zatvorena je u jednoj od kasnijih faza modeliranja, a praznina iza stražnje klupe, prikazana na slici 52. će zbog konstrukcijskih zahtjeva morati ostati neispunjena. Naime, zbog potrebe za povećanjem prtljažnog prostora, stražnja klupa mora biti preklopiva i preklapanjem treba ostati otvoreni prolaz između prtljažnog i putničkog prostora.



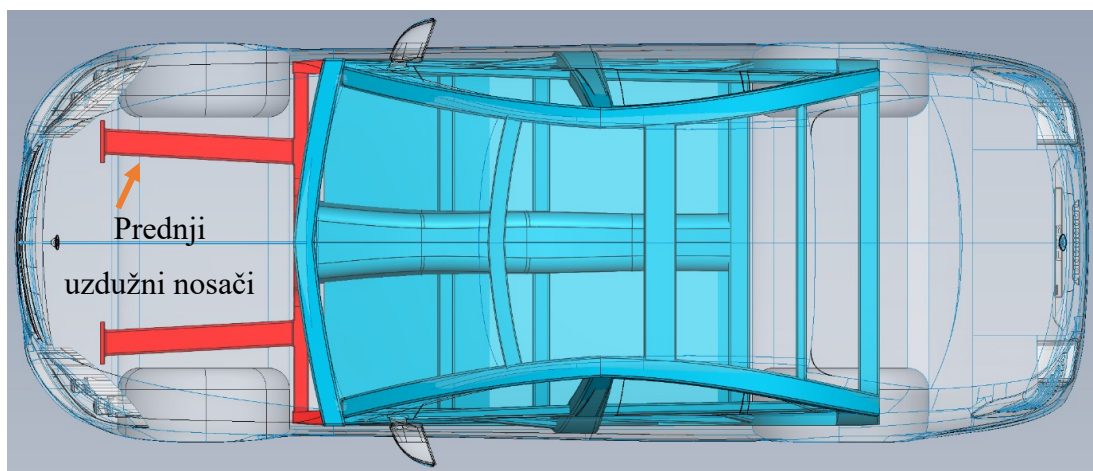
Slika 52. Pogled na stražnju prazninu

Idući korak je dodavanje nosača vatrozida i prednjih uzdužnih nosača, koji su ujedno i deformacijske strukture. Također, na stup ispred prednjih vrata dodane su dvije manje deformacijske zone. Postojanje ove dvije zone ovisi o samoj pogonskoj konfiguraciji vozila. Primjerice, Mercedes S klase korišten u radu ima nešto manji prednji prevjes, a nešto više prostora između prednje osovine i ruba prednjih vrata. U tom prostoru mogu se smjestiti ovakve deformacijske zone koje mogu preuzeti opterećenje. Ukoliko se radi o vozilu koje zbog rasporeda pogonskog sklopa ima nešto veći prevjes, a nešto manje prostora između prednje osovine i prednjih vrata, kao što je primjerice model Audi Q8 prikazan ranije u ovome radu, za ovakva ojačanja ne bi bilo dovoljno prostora.



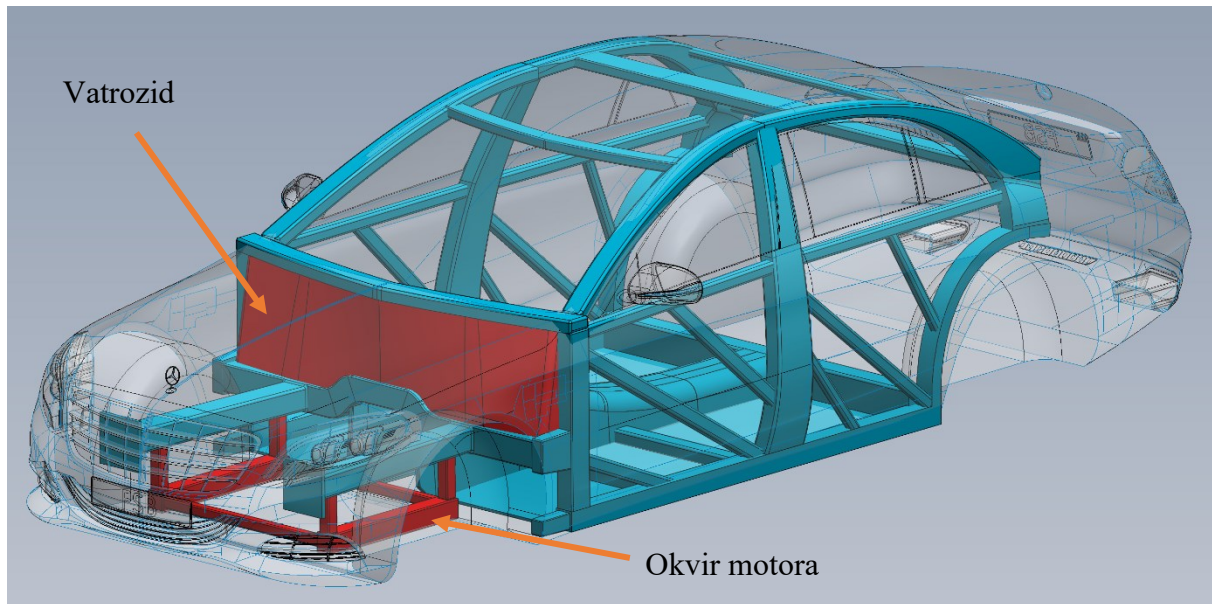
Slika 53. Nadogradnje prednje strane BIW-a, prednji pogled

Slika 53. prokazuje navedene elemente crvenom bojom iz prednjeg pogleda, a slika 54. iz tlocrta.



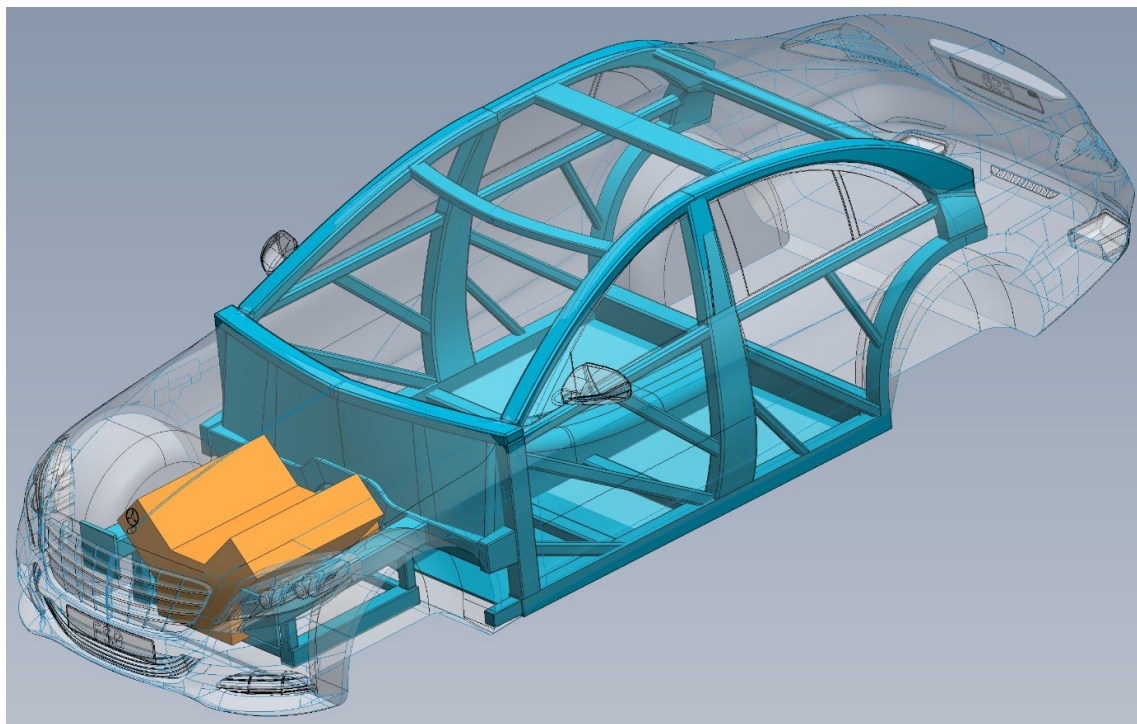
Slika 54. Nadogradnja prednje strane BIW-a, tlocrt

Sada kada je postavljen nosač vatrozida, moguće je vatrozidom zatvoriti putnički prostor s prednje strane. Također, na prednje uzdužne nosače veže se okvir motora, čije je uloga prihvat motora vozila. Vatrozid i okvir motora crvenom su bojom prikazani na slici 55.



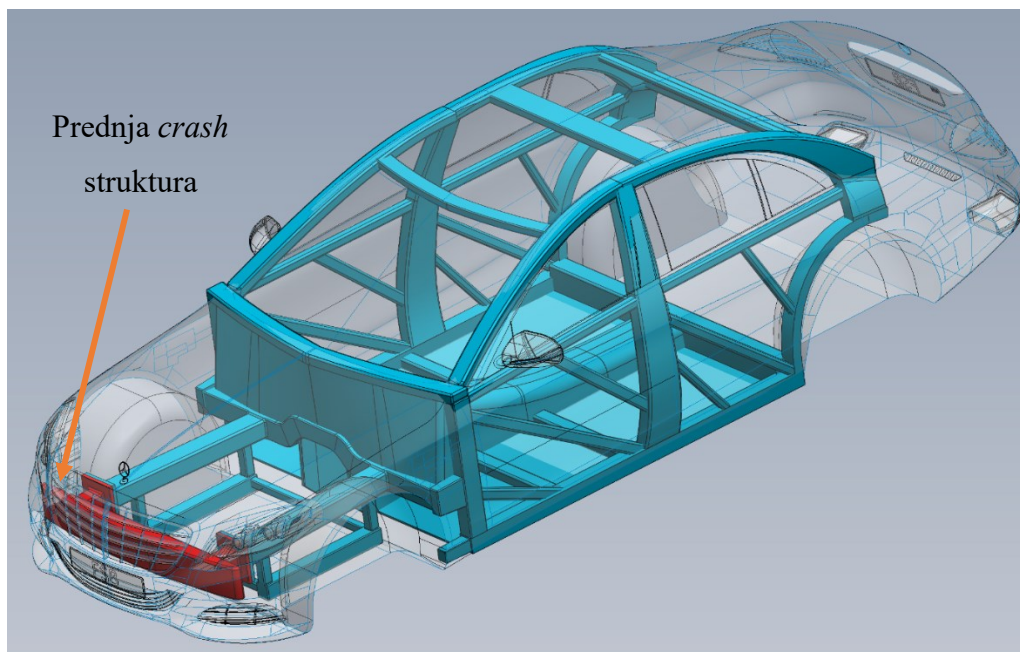
Slika 55. Pogled na vatrozid i okvir motora

Slika 56. prikazuje motor ugrađen u predviđeni prostor.



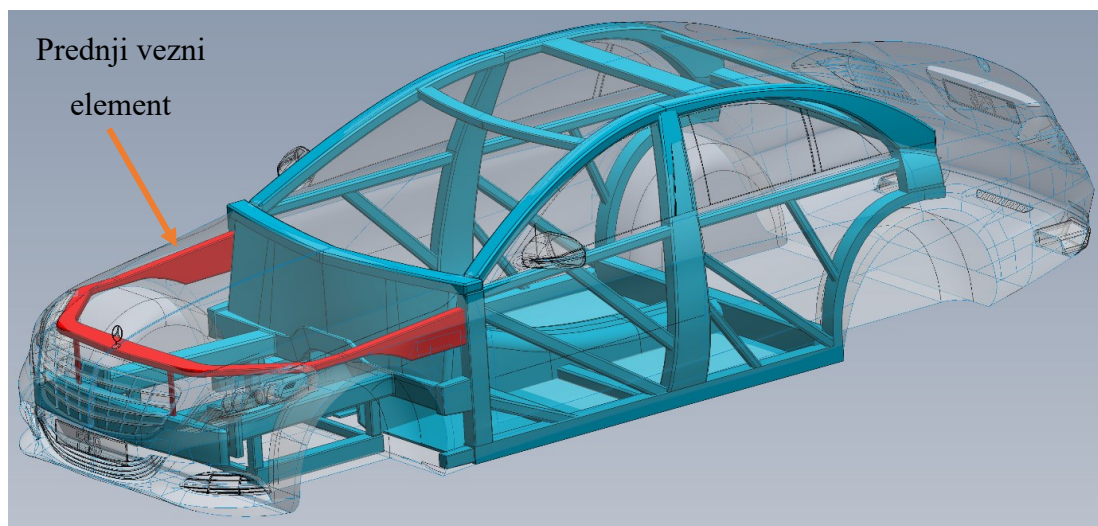
Slika 56. Motor ugrađen u predviđenom prostoru

Na prednje uzdužne nosače dodane u prošlom koraku dodaje se prednja *crash* struktura prikazana crvenom bojom na slici 57.



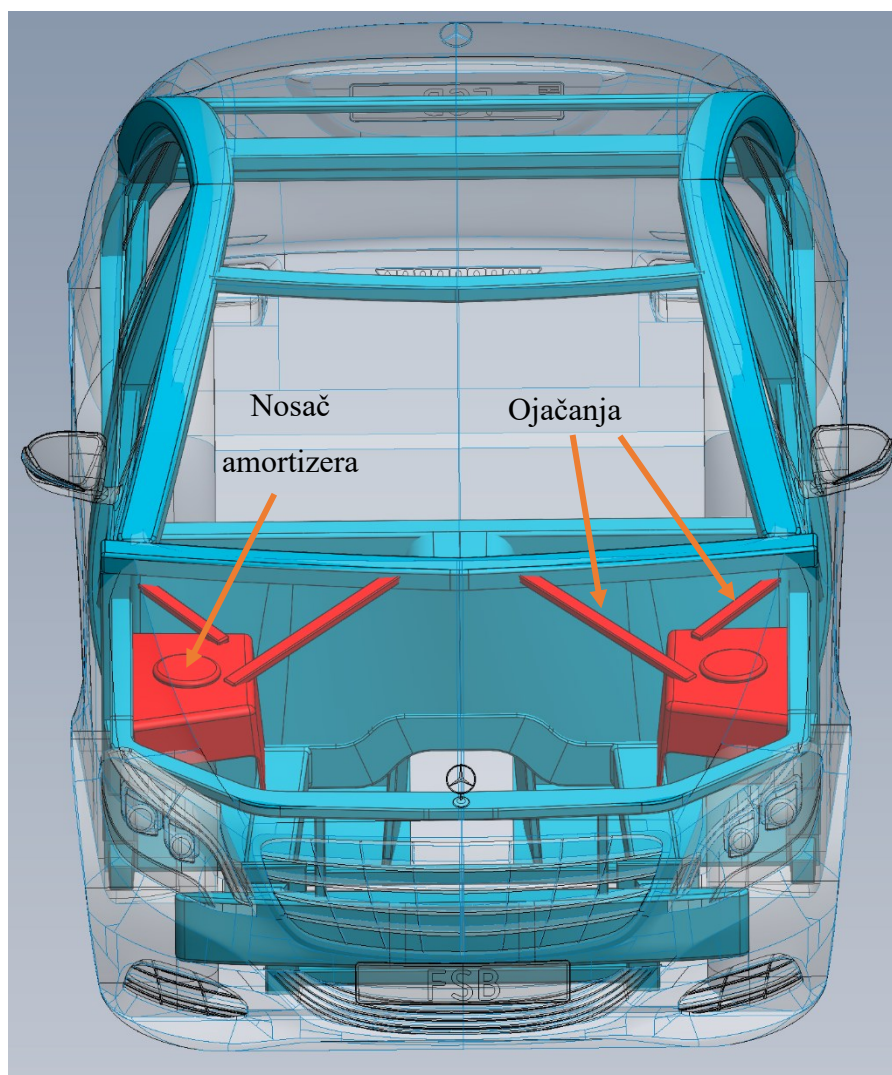
Slika 57. Prednja *crash* struktura povezana s prednjim uzdužnim nosačem

Ispod prostora poklopca motora prednji dio zaokružen je veznim elementom koji povezuje stupove ispred prednjih vrata i gornji dio *crash* strukture. U stvarnosti, ovaj element bio bi izrađen iz više pojedinačnih elemenata (vezni lim i blatobrani), no u modelu je zbog pojednostavljenja izrađen u cjelini. Slika 58. prikazuje navedeni element.

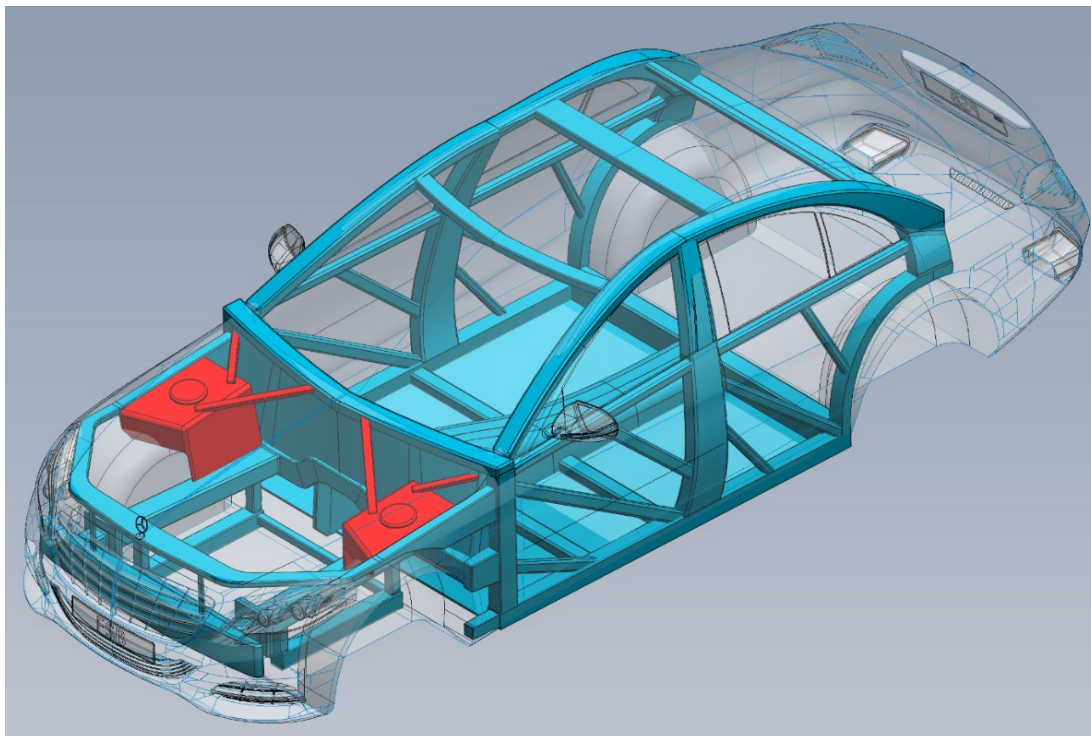


Slika 58. Prednji vezni element

Na prednju stranu potrebno je još dodati nosače amortizera i ojačanja koji povezuju navedene elemente s ostatkom BIW-a. Kružni element na nosačima modeliran je kako bi predstavljao mjesto predviđeno za aksijalni ležaj amortizera. Slika 59. i slika 60. prikazuju navedene elemente

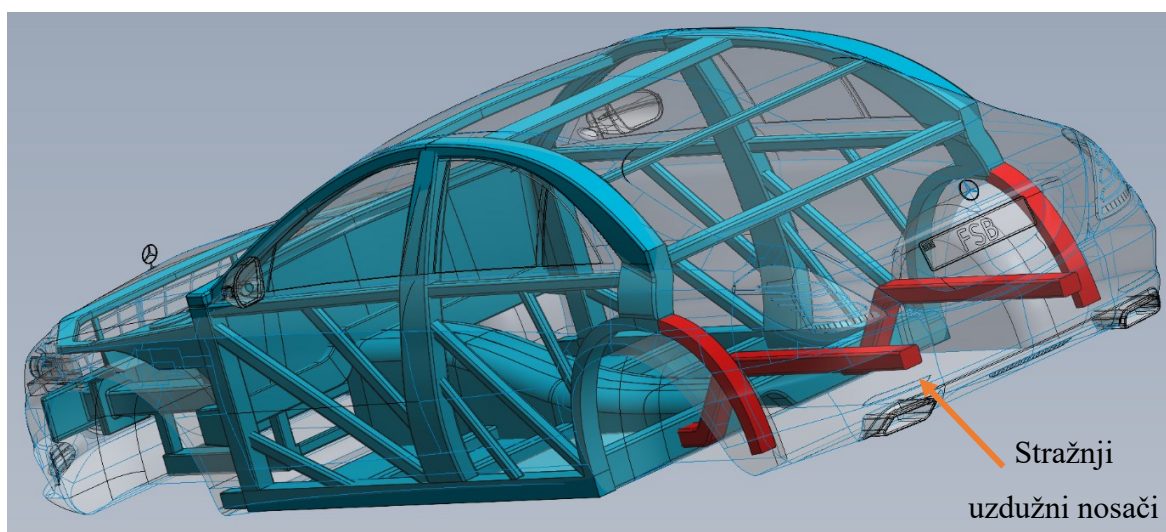


Slika 59. Prednji nosači amortizera s ojačanjem

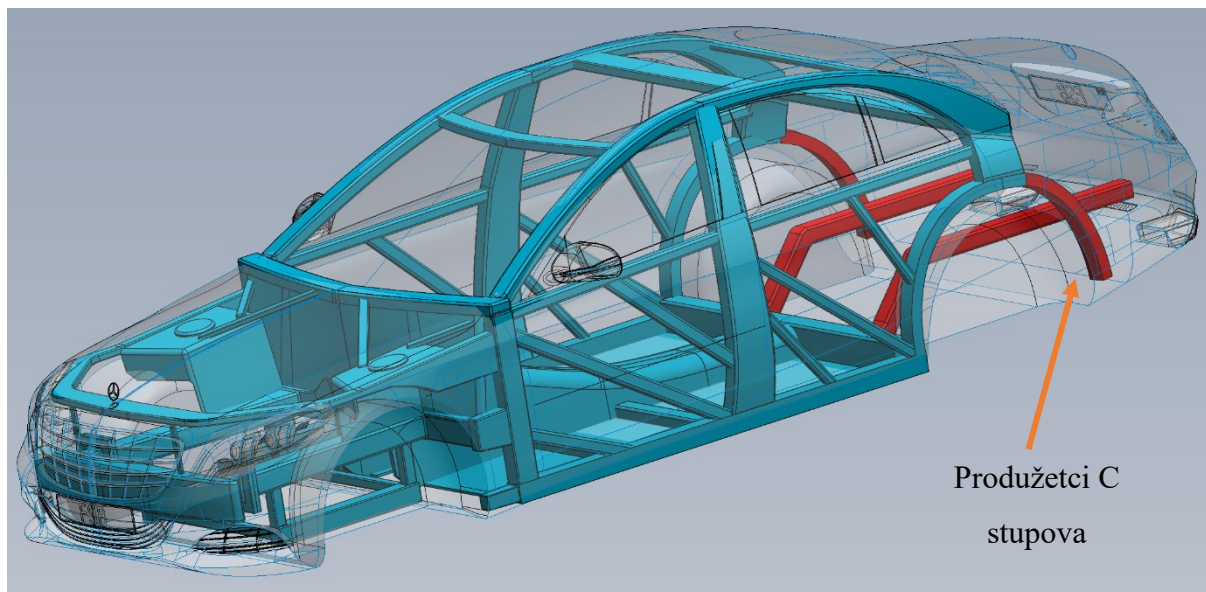


Slika 60. Konačna verzija prednjeg dijela BIW-a

Time je završen prednji dio BIW-a. Stražnji dio BIW-a modeliran je slično prednjemu. Prvo su dodani stražnji uzdužni nosači na koje će se vezati stražnja *crash* struktura. Sam položaj uzdužnih nosača uvjetovan je prostorom koji je potrebno ostaviti za dijelove pogonskog sklopa – kardan, diferencijal i pogonska vratila stražnjih kotača. Osim uzdužnih nosača, dodani su i produžetci C stupova. Navedeni elementi crvenom bojom prikazani su na slici 61. i slici 62.

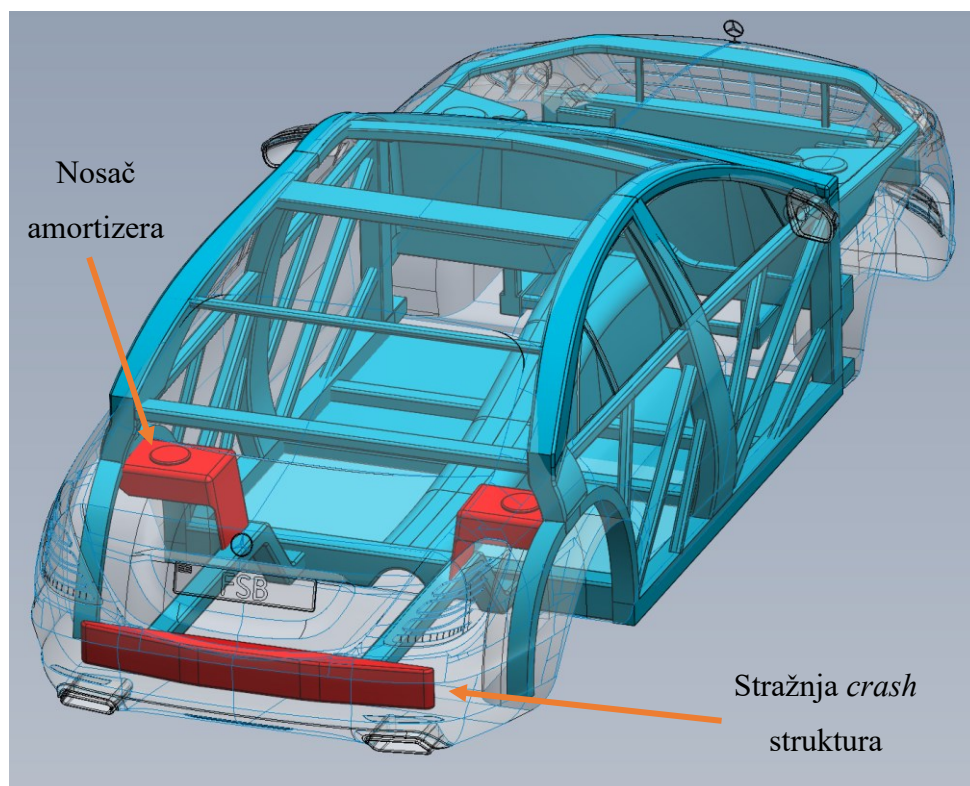


Slika 61. Nadogradnja BIW-a stražnjim elementima, pogled straga



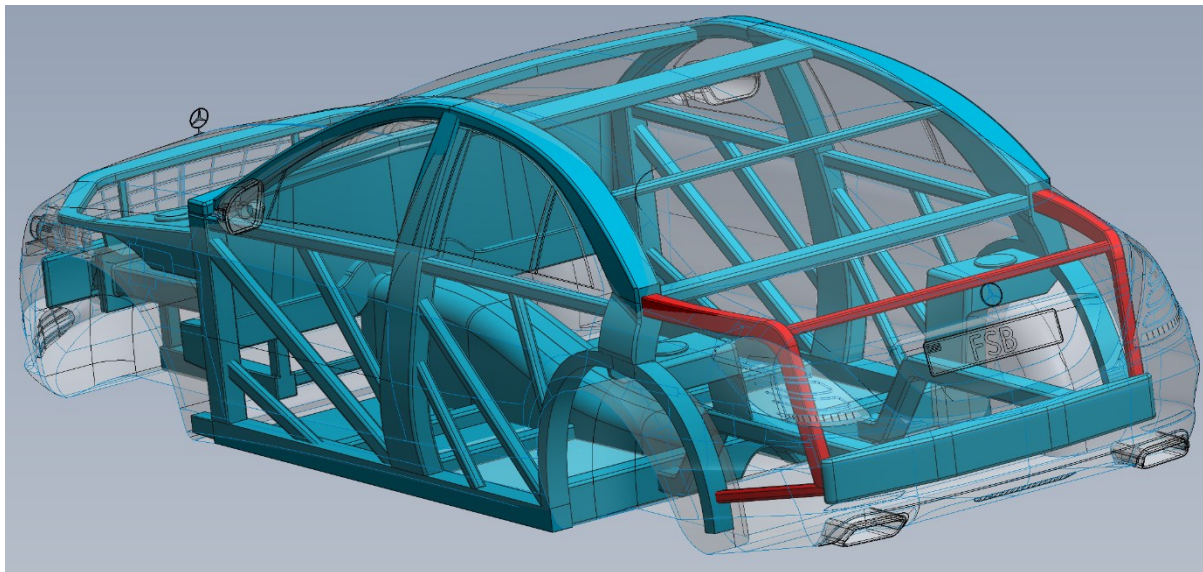
Slika 62. Nadogradnja BIW-a stražnjim elementima

Stražnja *crash* struktura veže se na stražnje uzdužne elemente. Nosači stražnjih amortizera napravljeni su slično prednjima, a njihov položaj i veličina uvjetovani su potrebnim prtljažnim prostorom. Navedeni elementi crvenom su bojom označeni na slici 63.



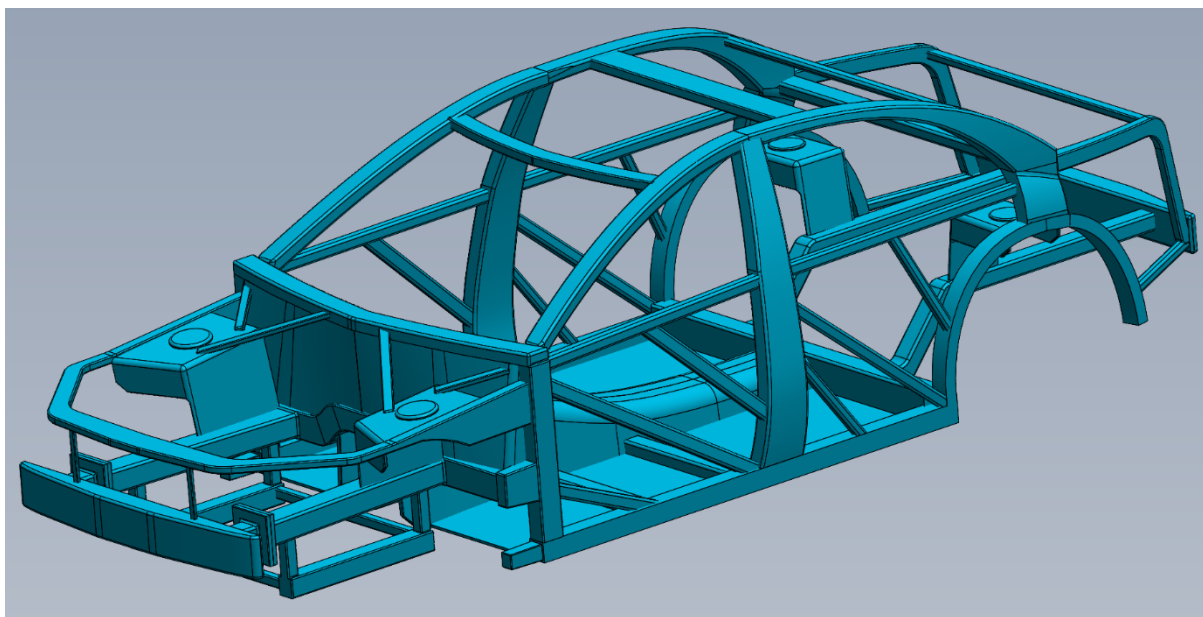
Slika 63. Stražnja *crash* struktura i nosači stražnjih amortizera

Na kraju, dodani su još elementi kojima se zaokružuju vrata prtljažnika, te dodatno povezuje stražnja *crash* struktura sa ostatkom BIW-a. Slika 64. prikazuje novododane elemente.



Slika 64. Konačna verzija stražnjeg dijela BIW-a

Na Slika 65. prikazan je konačan model BIW-a.



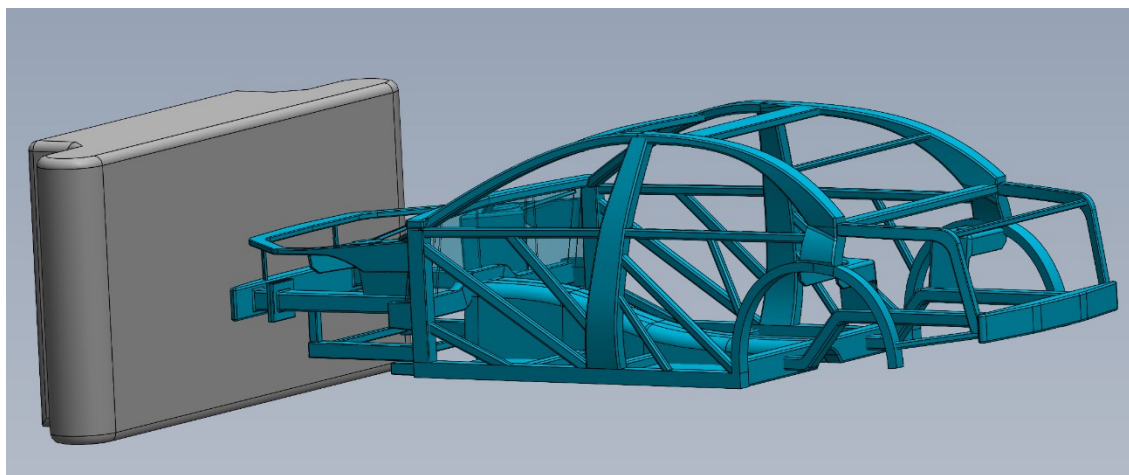
Slika 65. Konačan model BIW-a

5. Tok sila

U nastavku poglavlja napravljen je prikaz toka sila za tri slučajeve udara – frontalni s potpunim preklapanjem, frontalni s 25 % preklapanja te bočni sudar.

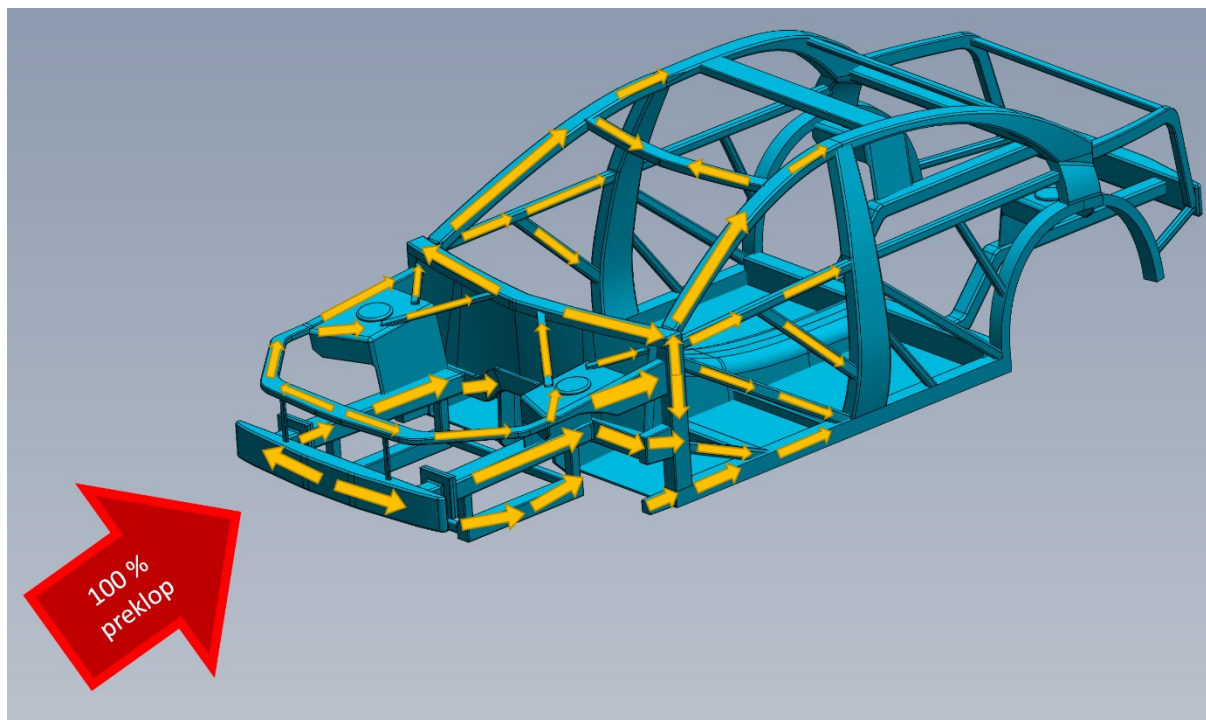
5.1 Frontalni udar, 100 % preklop

Frontalni udar s potpunim preklopom prednje površine vozila i barijere replicira Euro NCAP-ov test frontalni udar u nepokretnu barijeru. Slika 66. prikazuje navedeni test u CAD-u.



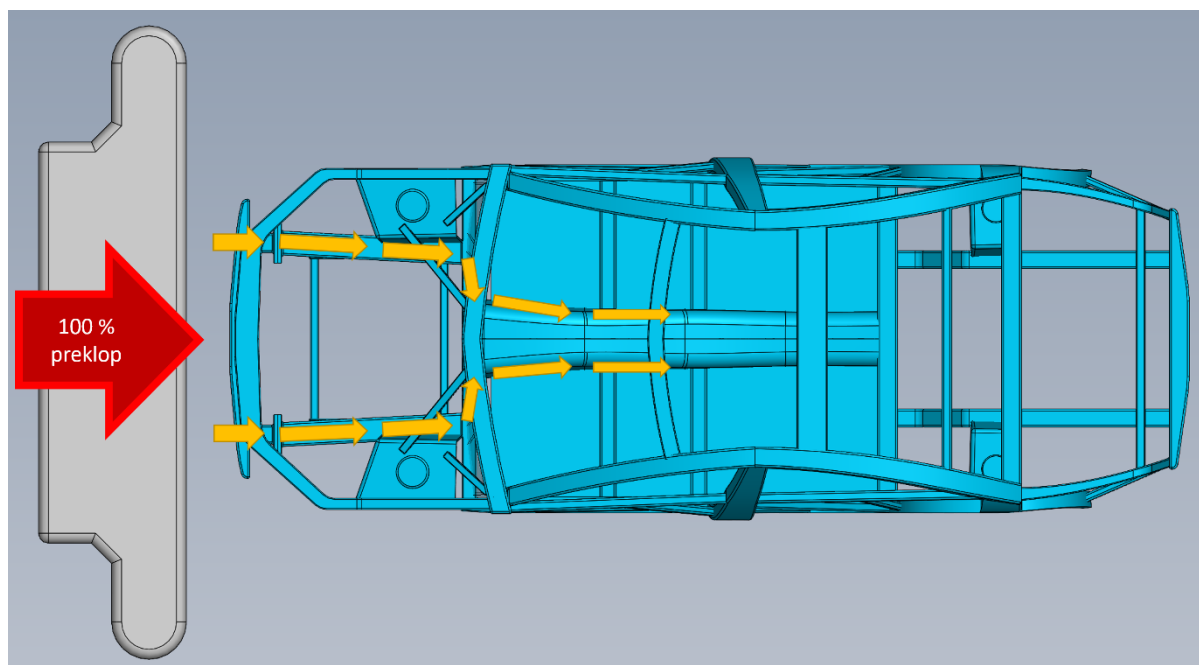
Slika 66. Prikaz testa frontalni udar s 100 % preklopom u CAD-u

Slika 67. prikazuje prikaz toka sila kod navedenog udara.



Slika 67. Frontalni udar, 100 % preklop, prikaz toka sile

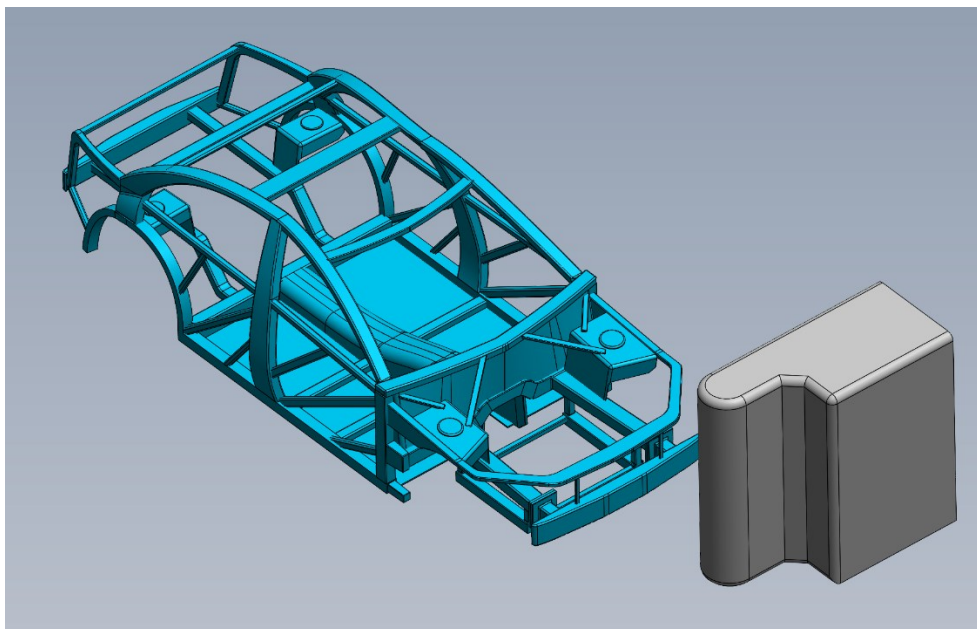
Obzirom da na slici 67. sile prema središnjem tunelu mjenjača zbog preglednosti nisu prikazane, slika 68. prikazuje samo tok sile od prednje *crash* strukture prema središnjem tunelu.



Slika 68. Frontalni udar, 100 % preklop, prikaz toka sile, pogled iz tlocrta

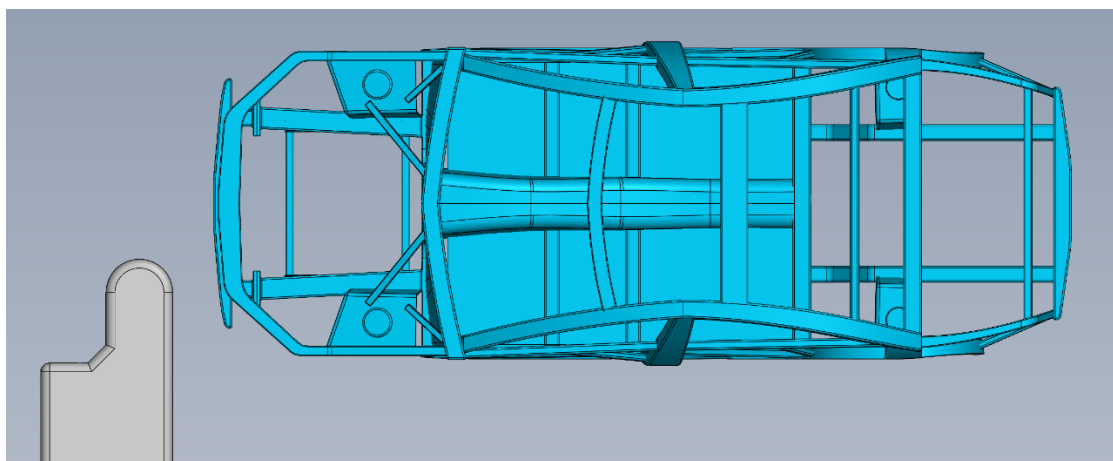
5.2 Frontalni udar, 25 % preklop

Frontalni udar s preklapanjem prednje površine vozila i barijere od 25 % replicira IIHS-ov *driver-side small overlap frontal test*. Slika 69. prikazuje navedeni test u CAD-u.

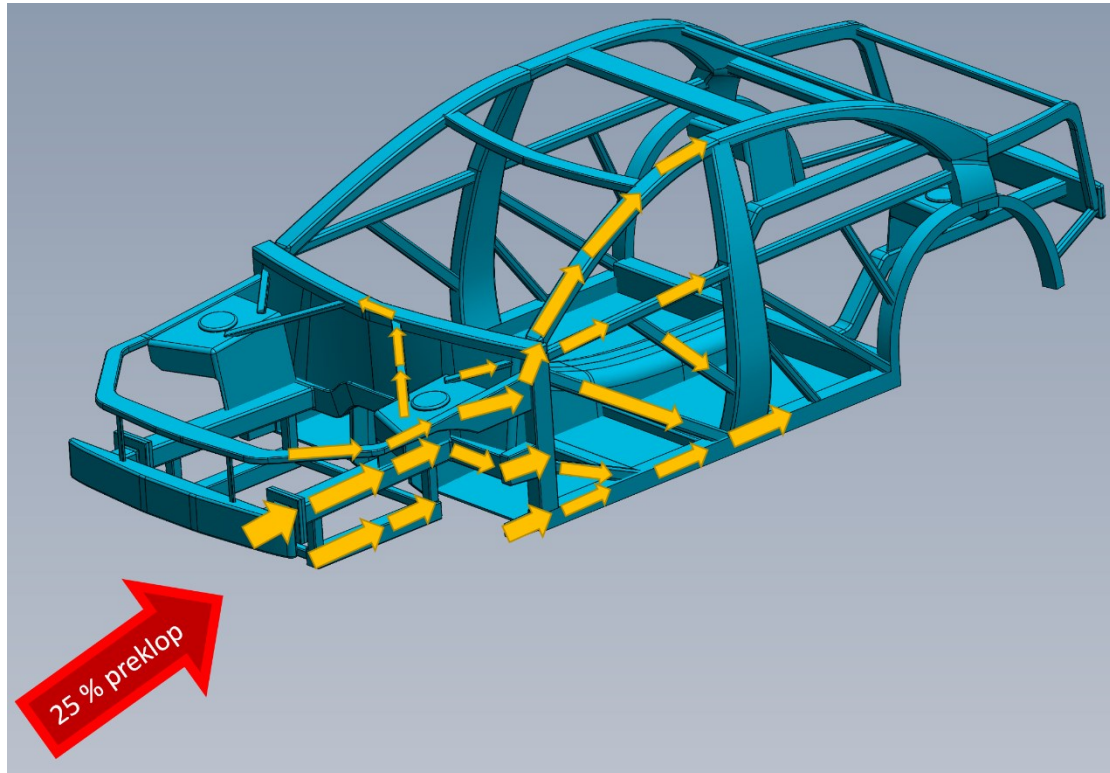


Slika 69. Prikaz testa frontalni udar s 25 % preklopom u CAD-u

Kako bi se zornije prikazao preklop od 25 %, slika 70. prikazuje navedeni test iz tlocrta. Uspoređujući sliku 68. i sliku 70., lako se može vidjeti kako kod testa s preklapanjem 25 %, znatno manji dio BIW-a može preuzeti opterećenje. Na slici 71. prikazan je tok sila.



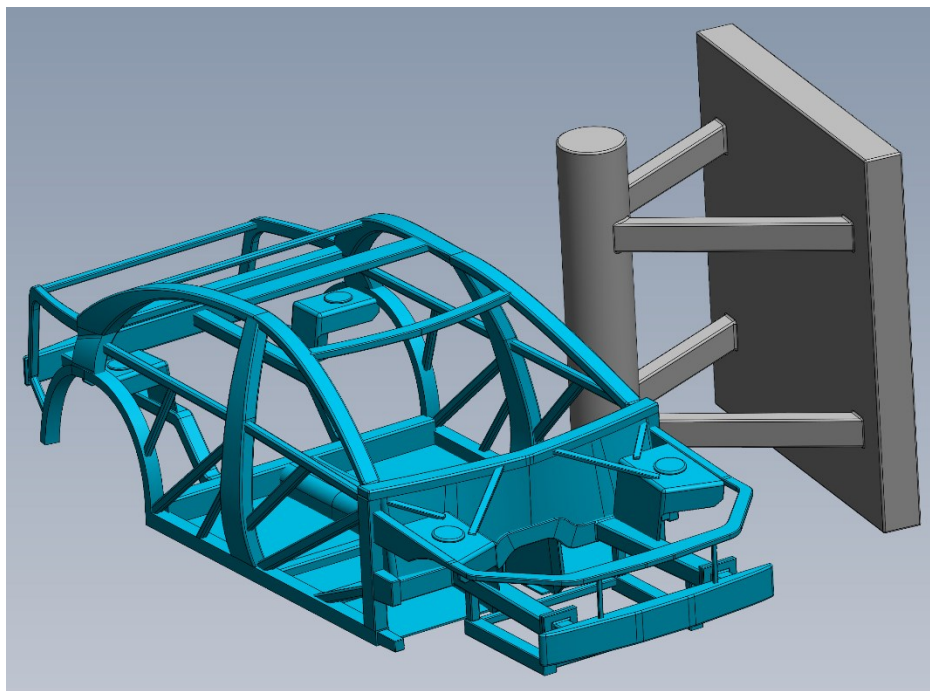
Slika 70. Prikaz testa frontalni udar s 25 % preklopom u CAD-u, pogled iz tlocrta



Slika 71. Frontalni udar, 25 % preklop, prikaz toka sila

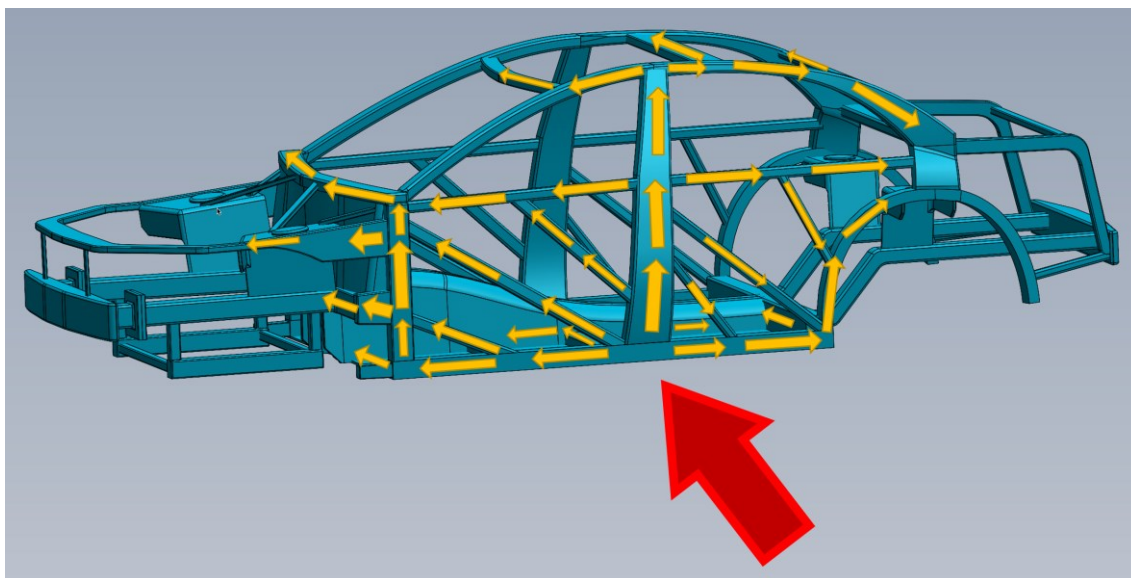
5.3 Bočni udar

Bočni udar korišten u poglavlju napravljen je po uzoru na Euro NCAP-ovog testa bočnog udara u nepokretan stup. Slika 72. prikazuje prikaz testa u CAD-u.

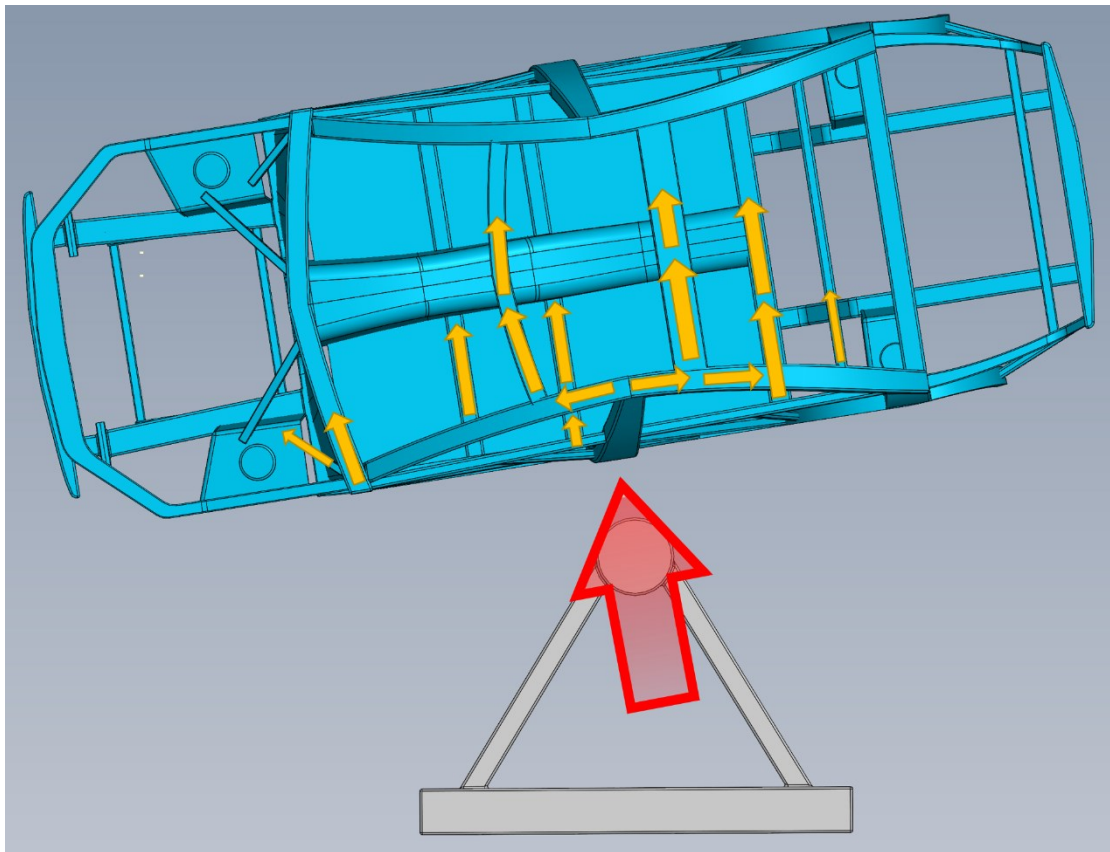


Slika 72. Prikaz testa bočni udar s u CAD-u

Slika 73. prikazuje tok sila s bočnog, a slika 74. iz pogleda u tlocrtu.



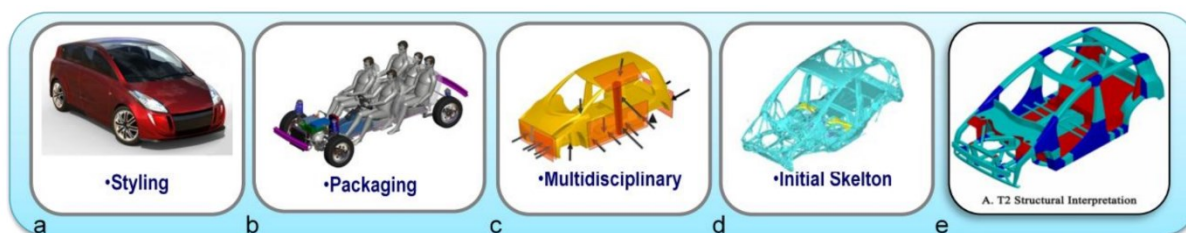
Slika 73. Tok sila kod bočnog udara



Slika 74. Tok sila kod bočnog udara, pogled iz tlocrta

6. Priprema za topološko optimiranje

Na slici 75. prikazano je pet koraka razvoja BIW-a vozila. Usporedi li se sadržaj ovoga rada sa slikom 75., vidi se da je model iz ovoga rada trenutno na koraku „c“, odnosno da bi sljedeća dva koraka razvoja bila detaljnija razrada samog modela i topološko optimiranje. Kako bi se zornije prikazala razina izmjena kojoj će inicijalni BIW biti podvrgnut, u nastavku poglavlja napravljen je približan proračun mase koja će BIW-u biti smanjena nakon topološkog optimiranja.



Slika 75. Pet koraka razvoja BIW-a vozila [13]

Ukupan volumen modela BIW-a sa slike 65. određen je u programskom paketu Solidworks i iznosi približno iznosi $0,42 \text{ m}^3$. Uzme li se prosječna vrijednost gustoće čelika $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$, može se izračunati približna masa modela BIW-a koja tada iznosi 3300 kg. Približna masa stvarnog BIW-a modela Mercedes S klase može se izračunati pomoću izraza (10). Uzimajući približne vrijednosti dimenzija vozila duljina $L = 5,1 \text{ m}$, širina $W = 1,9 \text{ m}$ i visina $H = 1,5 \text{ m}$ dobiva se masa stvarnog BIW-a od približno 370 kg.

Uspoređujući masu punoga neoptimiranog modela izračunate pomoću volumena i gustoće, te mase izračunate pomoću izraza (10), može se zaključiti da će se prilikom topološke optimizacije masa BIW-a smanjiti za otprilike 88 %. Do promjene u masi doći će zbog korištenja šupljih, a ne punih elemenata i promjene oblika elemenata, primjerice umjesto pravokutnog profila koristiti će se U-profil, te će se napraviti različiti provrti i otvori kao što je provrt za stup volana u vatrozidu i sl.

7. ZAKLJUČAK

U radu je napravljen pregled simulacija sudara dviju najrespektabilnijih udruga koje provode simulacije – Euro NCAP i IIHS. Poseban naglasak stavljen je na frontalne i bočne testove udara, točnije na Euro NCAP-ov test sudara s pokretnom progresivno deformabilnom barijerom, udar u nepokretnu barijeru, bočni test s pomičnom barijerom, te bočni test udara u stup, te na IIHS-ove prednji udar sa srednjim preklapanjem, prednji udar s malim preklapanjem na strani vozača i test bočnog udara. Za svaki *crash* test opisani su uvjeti u sudaru i prikazana su karakteristična oštećenja vozila. Za Euro NCAP-ov frontalni MPDB test i IIHS-ov bočni test proveden je i približan izračun energije i sile koja djeluje na vozila prilikom sudara. Napravljen je pregled karakterističnih rješenja elemenata nosive strukture vozila kod postojećih vozila na tržištu, materijala koji se koriste za pojedine elemente i vrsta tehnologija povezivanja. Na osnovu prikazanih karakterističnih rješenja elemenata nosive strukture kod postojećih vozila na tržištu izrađeni je 3D model nosive strukture vozila, gdje je za svaki element nosive strukture vozila argumentirano navedeno zašto i gdje se postavlja, okvirni oblik, poprečni presjek, navedena je uloga svakog pojedinog elementa, te problemi i ograničenja koji se javljaju prilikom pozicioniranja elementa. Za izrađeni 3D model koncepcijskog rješenja nosive strukture vozila, prikazan je mogući tok sila za tri sudara (frontalni s punim i djelomičnim preklapanjem te bočnim sudarom). Izrađeni 3D model sastoji se od profila punog poprečnog presjeka i podloga je za topološko optimiranje u daljnjem koraku razrede nosive strukture vozila. Za definiranje opterećenja kod topološkog optimiranja mogu se koristiti sile i energija izračunate za konkretne slučajeve sudara. Iako koncipirana nosiva struktura izgleda vitko, ako se usporedi volumen koncipiranog rješenja i volumen nosive strukture vozila sličnih dimenzija, može se zaključiti da će se u topološkom optimiranju odbaciti gotovo 90 % volumena izrađenog 3D modela.

LITERATURA

- [1] Lukaszewicz, D. H.-J.A., Automotive Composite Structures for Crashworthiness, Research and Innovation Centre, BMW AG, 2014.
- [2] [Preliminary 2021 EU Road Safety Statistics \(europa.eu\)](#) (pristup 12/2022)
- [3] [2021 Statistics of Road Traffic Accidents in Europe and North America | UNECE](#) (pristup 12/2022)
- [4] [Euro NCAP | General](#) (pristup 12/2022)
- [5] [www.euroncap.com](#) [A3 test] (pristup 12/2022)
- [6] [About our tests \(iihs.org\)](#) (pristup 12/2022)
- [7] [2023 Subaru Impreza \(iihs.org\)](#) (pristup 12/2022)
- [8] [NHTSA | National Highway Traffic Safety Administration](#) (pristup 12/2022)
- [9] [Macey S., Warrdler G., H-Point The Fundamentals of Car Design & Packaging, Art Center College of Design, 2009.](#)
- [10] [Models | Audi MediaCenter \(audi-mediacenter.com\)](#) (preuzeto 01/2023)
- [11] [Rimac Nevera Takes the Hypercar Market by Storm - Rimac Automobili \(rimac-automobili.com\)](#) (pristup 01/2023)
- [12] Naito J., Suzuki R., Multi-material Automotive Bodies and Dissimilar Joining Technology to Realize Multi-material, Automotive Solution Center, Technical Development Group, 2020.
- [13] Farahani A., Shaw J., Following Nature's Lead for Ultimate Design Efficiency The ACP Process as Applied to FSV, US Steel, 2015.
- [14] [An Extremely Detailed Look At The Porsche Taycan's Engineering Designed To Take On Tesla \(jalopnik.com\)](#) [preuzete slike s Porsche Newsroom] (preuzeto 01/2023)
- [15] Lian R., Liu X., Hu Y., Ren L., Bastien C., An FSRW numerical simplification approach for vehicle frontal crashworthiness analysis, International Journal of Crashwothiness, 2021.
- [16] [2016 Honda Pilot Body Structure - Boron Extrication](#) (pristup 01/2023)
- [17] [Mercedes-Benz Group Media](#) (preuzeto 01/2023)
- [18] F. Duddeck, K. Volz, A new Topology Optimization Approach for Crashworthiness of Passenger Vehicles Based on Physically Defined Equivalent Static Loads, Technische Universität München, 2012.

- [19] Mau R., Hybrid Low-Order Modeling for Conceptual Vehicle Design, Clemson University, 2013.
- [20] Yusof N. S. B., Sapuan S. M., Sultan M. T. H., Jawaid M., Maleque M. A., Design and materials development of automotive crash box a review, Sociedade Portuguesa de Materials, Maleque, 2017.
- [21] Kongwat S., Homsnit T., Paduntree C., Tonitiwong N., Jongpradist P., Jongpradist P. Safety Assessment and Crash Compatibility of Heavy Quadricycle under Frontal Impact Collisions, MDPI, 2022.
- [22] [Mercedes Benz S Class 2013 | 3D CAD Model Library | GrabCAD](#) (pristup 01/2023)