

**Факултет инжењерских наука
Универзитета у Крагујевцу**



Марта Б. Танасковић

**Поступак израде модела средњих површина
танкозидних конструкција у софтверу Femap**

Завршни рад

Крагујевац, 2019

**Факултет инжењерских наука
Универзитета у Крагујевцу**



Назив студијског програма: Машинско инжењерство
Ниво студија: Основне академске студије
Модул: Примењена механика и аутоматско управљање
Предмет: Механика 1
Број индекса: 11/2016

Марта Б. Танасковић

**Поступак израде модела средњих површина
танкозидних конструкција у софтверу Femap**
Завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

- 1. Проф. др Владимир Миловановић-ментор**
2. _____
3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____



Универзитет у Крагујевцу
Факултет инжењерских наука



Основне студије: **Машинско инжењерство**

Студијско подручје (усмерење): **Примењена механика и аутоматско управљање**

Име и презиме: **Марта Танасковић**

Број индекса: **11/2016**

ПРИЈАВА ЗАВРШНОГ РАДА

Тема рада: **Поступак израде модела средњих површина танкозидних конструкција у софтверу Femap**

Задатак: У оквиру завршног рада кандидат треба да прикаже поступак израде средњих површина коришћењем алата Meshing Toolbox у софтверу Femap. Неопходно је да кандидат детаљно опише поступак обраде CAD модела, односно како се од 3D модела танкозидне конструкције на најједноставнији начин може доћи до МКЕ модела креираног коначним елементом љуске. Након израде модела средњих површина неопходно је да кандидат направи МКЕ модел и да пропусти прорачун у софтверу NX Nastran. На основу стечених искустава треба анализирати поступак израде модела и упоредити га са другим методама у погледу тачности резултата, брзине израде модела. На основу свих резултата до којих је кандидат дошао прилоком израде завршног рада потребно је извести закључна разматрања и дефинисати правце будућих истраживања.

Завршни рад треба да садржи следеће целине:

1. Уводна разматрања
2. Методе за израду модела средњих површина
3. Команде и предности Meshing Toolbox-а софтвера Femap
4. Поступак израде модела и његова анализа
5. Примена алата Meshing Toolbox на сложеније конструкције
6. Закључак
7. Литература

Ментор:

Проф. др Владимир Миловановић

Крагујевац, 13.06.2019.

Садржај

1. Уводна разматрања.....	1
2. Метода за израду модела средњих површина.....	3
2.1 Увоз разматране геометрије 3D модела	3
2.2 Аутоматско креирање површина	7
3. Команде и предности Meshing Toolbox-а софтвера Femap	8
3.1 Feature Suppression	8
3.2 Feature Removal	9
3.3 Feature Editing	11
3.4 Geometry Editing	14
3.5 Combined/Composite Curves	17
3.6 Combined/Boundary Surfaces Tool	19
3.7 Meshing Tools.....	20
3.7.1 Mesh sizing	20
3.7.2 Mesh Surface	22
3.8 Mesh Editing Tools	24
3.8.1 Mesh Locate.....	24
3.8.2 Surface Mesh Quality	26
4. Поступак израде модела и његова анализа	27
5. Примена алата Meshing Toolbox на сложеније конструкције	38
6. Закључак.....	40
Литература.....	41

Abstract

This paper examines midsurface construction using the Meshing Toolbox feature of the Femap software. The model creation process should be analyzed first and compared with other methods regarding the accuracy and speed of model creation. After importing CAD model, a detailed description of the creation of the middle surfaces is given, after which they were automatically created. Below is a description of Meshing Toolbox commands followed by examples. Then, some of the controls used to refine the middle surfaces were applied to the considered model. The task is to, in the simplest way, using the 3D thin-walled construction model, created by the finite element of the shell. After creating the FEM model, it is necessary to do the calculation in NX Nastran. Finally, it is necessary to make a conclusion and define future research and opportunities with knowledge of Meshing Toolbox.

Keywords: midsurfaces, FEM, Meshing Toolbox, plate

Резиме

У раду је приказан поступак израде средњих површина коришћењем алата Meshing Toolbox у софтверу Femap. Најпре је анализиран поступак израде модела и упоређен са другим методама у погледу тачности и брзине израде модела средњих површина. Након увезеног модела, дат је детаљан опис креирања средњих површина након чега су и аутоматски креиране. У наставку је дат опис команди Meshing Toolbox-а праћен примерима. Затим су на разматраном моделу примењене неке од команди при дорађивању модела средњих површина. Потребно је од 3D модела танкозидне конструкције на најједноставнији начин доћи до МКЕ модела креираним коначним елементом љуске. Након израде МКЕ модела потребно је пропустити прорачун у NX Nastran-у. На крају је изведен закључак и дефинисана су будућа истраживања и могућности познавањем алата Meshing Toolbox.

Кључне речи: средње површине, МКЕ, Meshing Toolbox, љуска

1. Уводна разматрања

Метода коначних елемената је метода која је незаобилазна у инжењерским прорачунима. Данас постоји велики број рачунарских програма заснованих на МКЕ која омогућава анализу конструкција без разматрања сложене теорије која описује физичко понашање конструкција. Њихово коришћење углавном се своди на задавање улазних података према одређеним правилима, зависно од природе проблема и добијају се графичка решења која се једноставно интерпретирају. Метода коначних елемената је нумеричка метода која даје приближно тачне резултате.

Сваки корисник рачунарских програма који се заснивају на овој методи треба да има на уму да су решења приближна, а реалним вредностима се могу приближити само уз правилан избор коначног елемента који су у могућности да опишу реалан процес деформације као и познавање теорије коначних елемената и њене примене.

Метода коначних елемената је нумеричка метода која се темељи на физичкој дискретизацији континуума. Континуум је континуално распоређени скуп материјалних тачака. Примери континуално распоређеног система материјалних тачака су чврста или крута тела, течности или гасови. Разматрани континуум са бесконачно степени слободе замењује се дискретним моделом међусобно повезаних елемената са ограниченим бројем степени слободе. Описивање континуума представља поједностављено разматрање јер се не улази у молекулани састав материје, а простор који материја испуњава сматра се континуално попуњеним, без празнина. Подручје континуума дели се на коначан број подручја који се називају коначни елементи односно разматрани континуум постаје мрежа коначних елемената. Коначни елементи међусобно су повезани тачкама на контури који се називају чворови. Поступак извођења једначина коначних елемената базира се на решавању диференцијалних једначина. Сложене контрукције захтевају дискретизацију са великим бројем елемената што подразумева решавање скупа алгебарских једначина са великим бројем непознатих, што је без употребе рачунара као алата готово немогуће. [1]

МКЕ примењује се у механици деформабилних тела за решавање статичких и динамичких проблема, као и за решавање општих проблема као што су прорачун температурних поља, прорачун струјања електромагнетних поља.

Зависно од облика и непознатих параметара у чворовима изведени су различити типови коначних елемената. Најчешће коришћени елементи су 3D и 2D коначни елементи континуума, затим и структурни елементи – љуска, плоча и греда.

Танкозидне конструкције налазе примену при конструкцији авиона, аутомобила, у грађевинарству, машинству и многим другим гранама индустрије. Мотивација за рад је управо велика примена коначног елемента љуске за прорачун танкозидних конструкција које се често срећу у индустрији. Употребом алата Meshing Toolbox, унутар софтверског

пакета Femap, на танкозидним контрукцијама се на ефикаснији и бржи начин може доћи до модела средњих површина.

Танки површински носачи општег облика називају се љуске. Дебљина љуске је обично много мања од осталих димензија.

Креирањем средњих површина дискретизује се геометрија модела којом се даље манипулише. Након формирања средњих површина од солида, на моделу долази до одређених зазора између површина које чине модел. Адекватно решење проблема неправилне геометрије и зазора без алата Meshing Toolbox подразумева поновно цртање у програму Femap уз ограниченост појединих функција.

За моделирање танкозидних конструкција коришћен је четвороугаони коначни елемент љуске.

Циљ рада је детаљно испитивање сваке алатке унутар наведене палете алата и поређење брзине, тачности израде модела средњих површина једном и другом методом, као и одређени недостаци опција.

Након дорађеног модела средњих површина креира мрежа на моделу и врши прорачун коришћењем солвера као и анализирање резултата прорачуна.

Рад се састоји од укупно шест поглавља и тематски је подељена на три целине. У првој целини је приказан поступак израде средњих површина. Други део рада се бави детаљним описом команди Meshing Toolbox-а. Применом одређених команди Meshing Toolbox креиран је модел средњих површина. Последња, трећа, целина обухвата прорачун у солверу NX Nastran, постпроцесирање и анализу добијених резултата прорачуна.

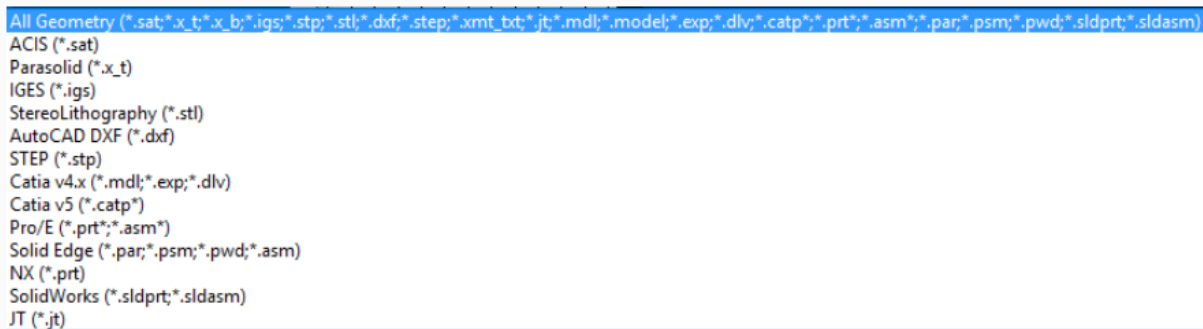
2. Методе за израду модела средњих површина

У ранији верзијама софтвера **Femap** модификовање средњих површина је било отежано због непостојања алата **Meshing Toolbox**. Након креирања средњих површина на моделу, потребно је додатно сређивање геометрије. На моделу постоје зазори, отвори и вишкови које је потребно уклонити.

При ранијим верзијама је било потребно мануелно исцртавати површине и из више корака уклањати геометрију, док је помоћу алата **Meshing Toolbox** читав процес убрзан јер је могуће лако манипулисати средњим површинама и екстендовати их. Уколико се прави паралела између опција ван и унутар **Meshing Toolbox-a**, опције унутар напоменутог алата ће се показати ефикаснијим и до неколико пута.

2.1 Увоз разматране геометрије 3D модела

Софверски пакет **Femap** углавном подржава све формате комерцијалних **CAD** програма што умногом олакшава рад кориснику. Пример импортовања формата геометрије креиране у неком од **CAD** програма дат је сликом 1.

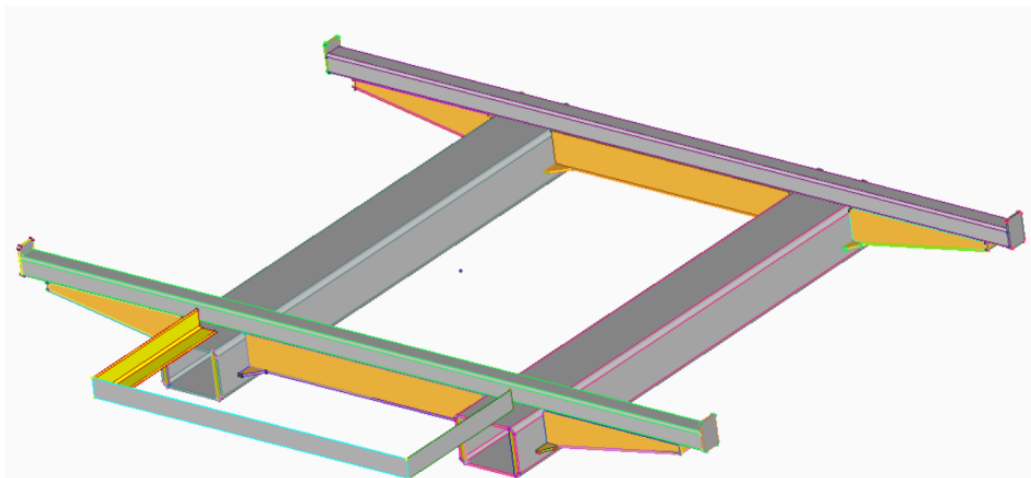


```
All Geometry (*.sat;*.x_t;*.x_b;*.igs;*.stp;*.stl;*.dxf;*.step;*.xmt_bxt;*.jt;*.mdl;*.model;*.exp;*.dlv;*.catp;*.prt;*.asm;*.par;*.psm;*.pwd;*.sldprt;*.sldasm)
ACIS (*.sat)
Parasolid (*.x_t)
IGES (*.igs)
StereoLithography (*.stl)
AutoCAD DXF (*.dxf)
STEP (*.stp)
Catia v4.x (*.mdl;*.exp;*.dlv)
Catia v5 (*.catp)
Pro/E (*.prt;*.asm)
Solid Edge (*.par;*.psm;*.pwd;*.asm)
NX (*.prt)
SolidWorks (*.sldprt;*.sldasm)
JT (*.jt)
```

Слика 1: CAD програми и формати које подржава Femap [2]

Геометрија се увози на следећи начин **File > Import > Geometry**. При увозу геометрије, треба водити рачуна о јединицама, па је у оквиру прозора **Step read option** опција **Geometry scale factor** омогућено кориснику да изабере јединице. Уколико се као **Geometry scale factor** унесе 1000 тада ће јединица дужине бити у mm.

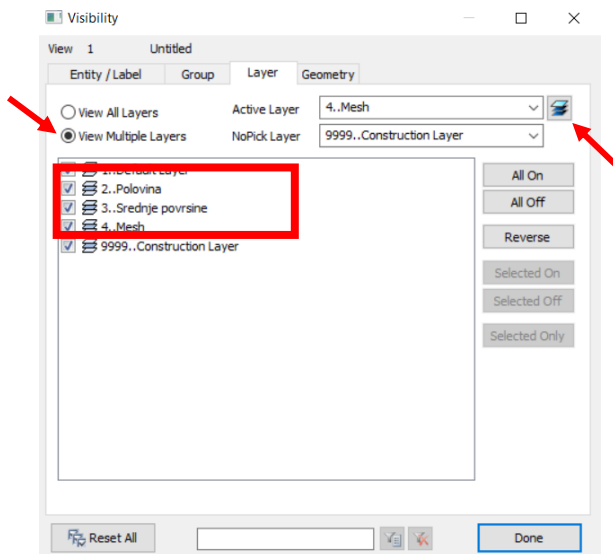
Након увезеног модела разматране конструкције (слика 2), потребно је од 3D модела доћи до 3D модела танкозидне конструкције формирањем средњих површина од постојеће геометрије.



Слика 2: Приказ увезеног модела

Уколико желимо да рад учинимо комфорнијим повољно је да геометрију и рад са средњим површинама распоредимо по **layer**-има.

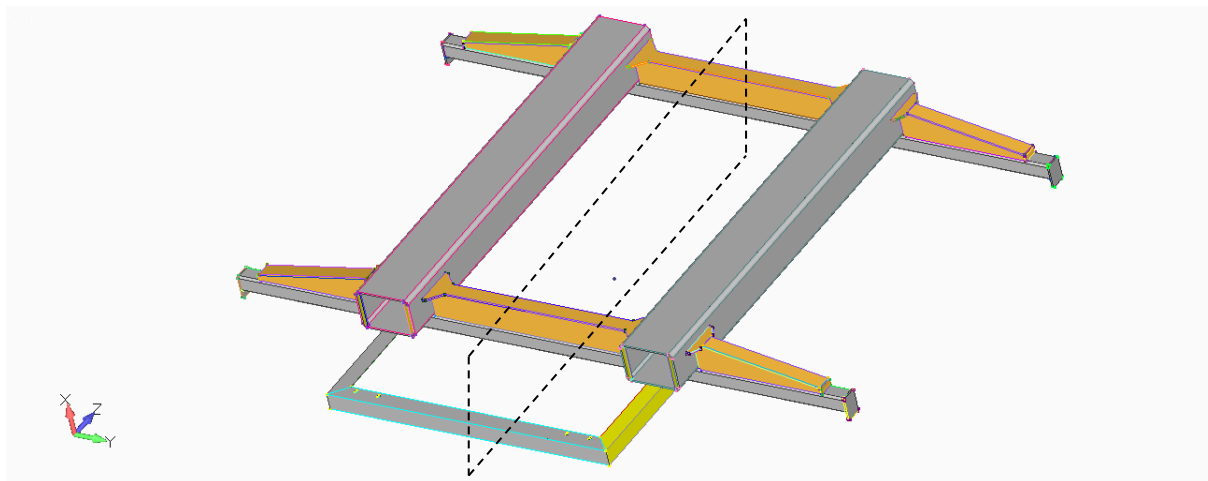
Најпре треба направити слојеве тј. **layer**-е на моделу опцијом **View > Visibility > Layer > New layer** (слика 3) при чему у раду треба водити рачуна о активном **layer**-у. Активан **layer** је онај у којем се чувају све тренутне промене на моделу. Као пример дат је модел приказан на слици 2 при чему су направљена још три layer-а поред постојећих: Mesh, Половина модела и Средње површине.



Слика 3: Прозор Visibility

Процес израде средњих површина је лакши и бржи уколико је модел геометријски симетричан. Као и код 3D моделирања, довољно је формирати мрежу коначних елемената на половини модела, уколико модел има једну раван симетрије, при чему се на другој половини може рефлексовати иста.

Модел је симетричан у односу на раван **ZX** (слика 4), што значи да модел можемо поделити на два једнака дела.

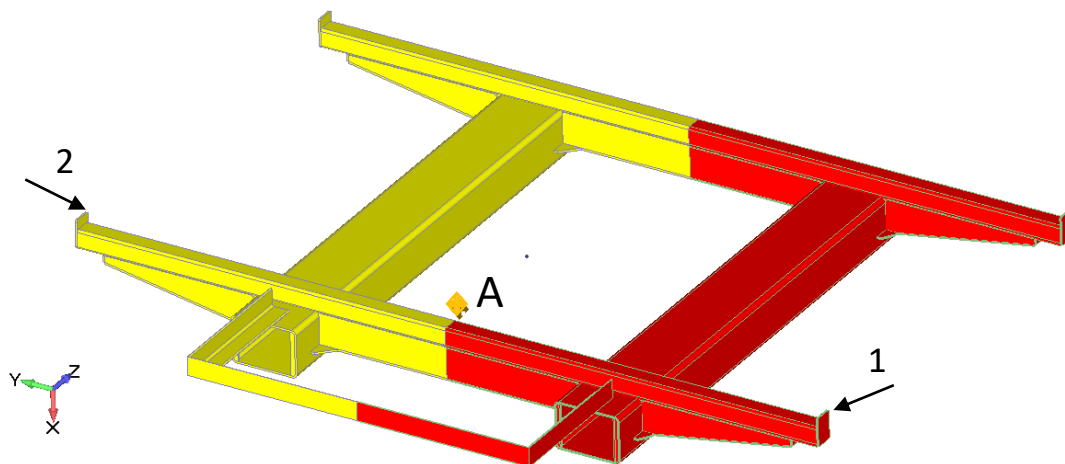


Слика 4: Приказ симетричности модела

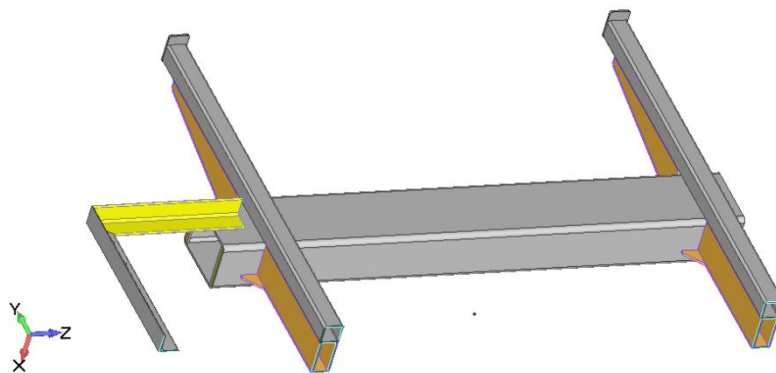
Најпре се креира тачка која се налази у равни симетрије на средини уздужног носача опцијом **Geometry > Point**, након чега се бира метода **Between**. Одабиром крајњих тачака на носачу и процентуалног растојања између њих (у овом случају је то 50% да би тачка била позиционирана на средини носача) креира се средишња тачка.

Пре одабира тачака, треба одабрати опцију **Snap to point** кликом на десни тастер миша. Опција **Snap modes** се користи за одабир координата, а сама опција **Snap to point** омогућава селектовање одређене тачке на геометрији. Након примене опције **Snap to point** и одабира крајњих тачака 1 и 2 добија се нова тачка А на средини модела.

Кроз новонасталу тачку А модел ће се поделити на два једнака дела опцијом **Slice**. До напоменуте опције се може доћи избором команди **Geometry > Solid > Slice > Method with plane** (слика 5), одабиром читавог солида при чему ће се као метод изабрати **Global plane**. Потребно је сагледати која раван је раван симетрије, у овом случају је то **ZX** раван и изабрати креирану тачку А као базу кроз коју ће пролазити раван. Након извршене команде, модел ће бити преполовљен.



Слика 5: Примена опције Slice на моделу

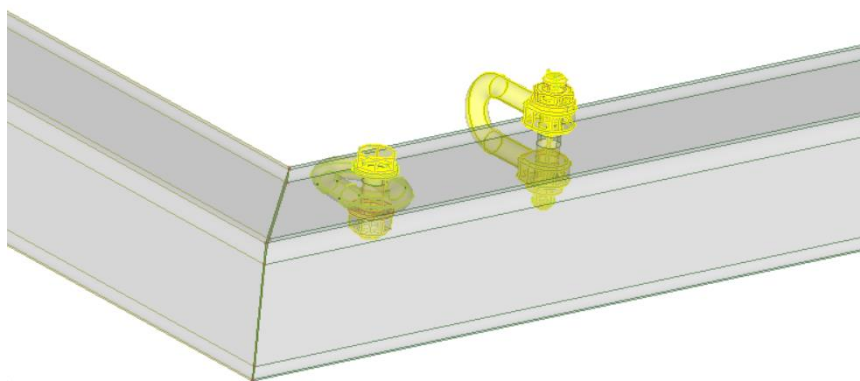


Слика 6: Половина модела

Затим је половину модела (слика 6) потребно пребацити у **layer** Половина модела, који мора бити активан, где ће се даље манипулисати њиме и креирати средње површине. Опцијом **Modify > Layer > Solid** и командом **Pick > Box** изабрати половину и селектовати **layer** Половина модела. Исти поступак поновити за површине, криве и тачке. Затим, за опцију **Modify > Layer > Surface** користити метод **Previous** којим ће бити селектоване све површине које претходно селектовани солид садржи. За **Modify > Layer > Curve** и **Modify > Layer > Point** користити методе **On Surface** и **On Curve** чиме ће се са површине означити све криве, а са кривих све тачке.

Пре почетка израде средњих површина, потребно је да видљиви **layer**-и буду Половина модела и Средње површине, при чему ће активан **layer** бити Средње површине. Потребно је уклонити непотребну геометрију селектовањем солида и премештањем у **Default layer** или је сасвим обрисати са модела јер неће утицати на чврстоћу конструкције. У случају овог модела, сликом 7 је приказано који делови се уклањају:

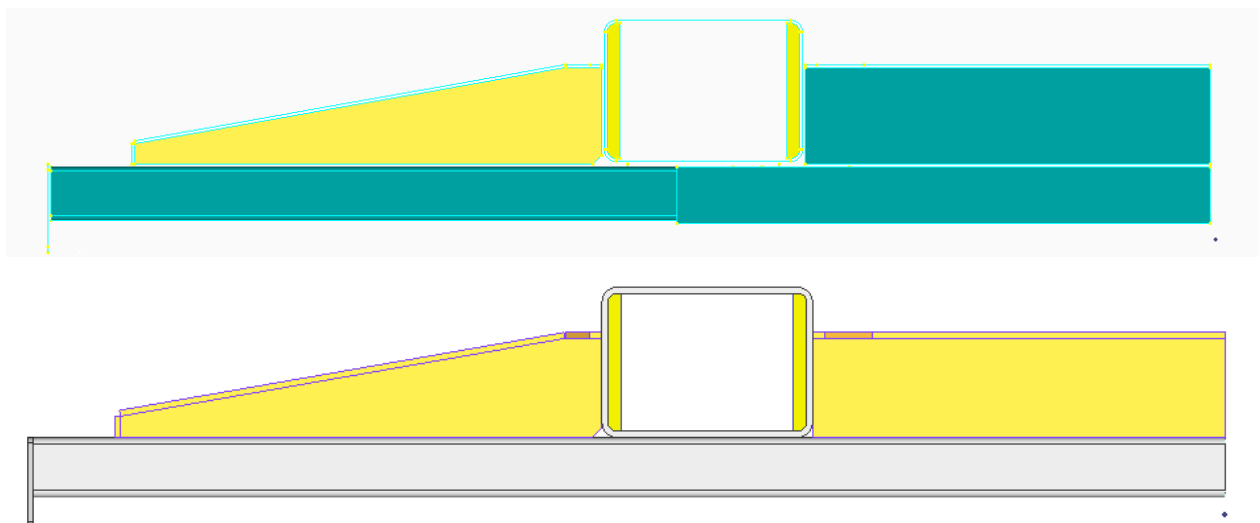
На местима уклањања солида са модела остаће отвори које је потребно накнадно затворити.



Слика 7: Непотребна геометрија на моделу

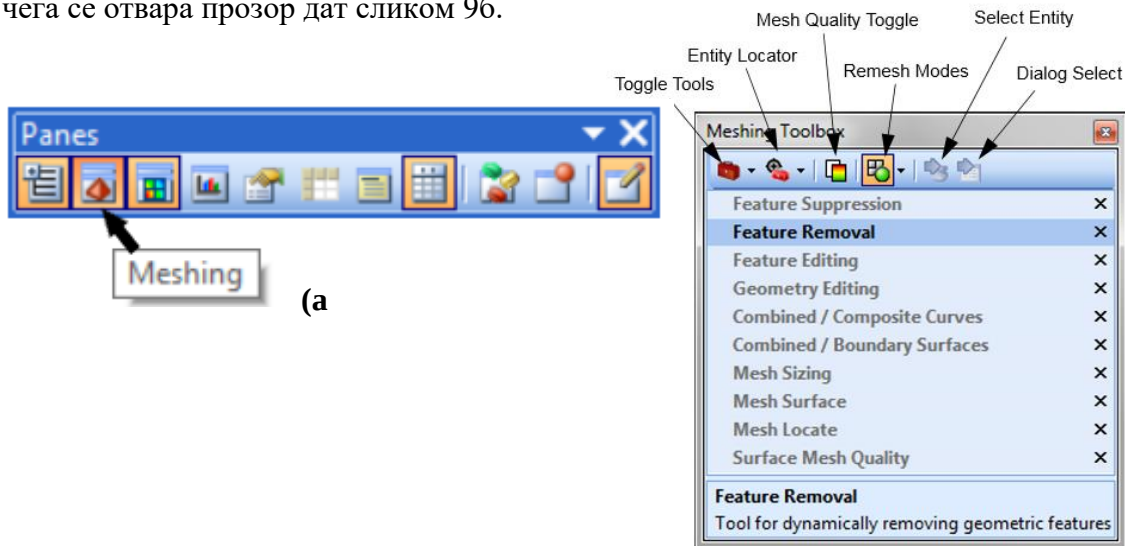
2.2 Аутоматско креирање површина

Средње површине се креирају опцијом **Geometry > Midsurface > Automatic** при чему ће се површина креирати између две површи солида. Корисник треба обратити пажњу да се изабере само половина модела у оквиру ког ће се формирати средње површине, затим и задати максималну дебљину између које ће се формирати средње површине. При изради габаритне мере модела остају исте, из тог разлога спојеви који постоје на солиду нису присутни и код средњих површина. Такозвани зазор који постоји само код средњих површина представља удаљење површина за половину дебљине површине (слика 8).



Слика 8: Упоредивање модела солида и средњих површина

Палета алата **Meshing Toolbox** унутар софтверског пакета **Femap** садржи алате које омогућавају дорађивање саме геометрије и мреже на моделу. Да би опција била активирана потребно је у прозору **Panes** одабрати иконицу приказану сликом 9а, након чега се отвара прозор дат сликом 9б.



(б)

Слика 9: Meshing Toolbox а) иконица, б) прозор [3]

3. Команде и предности Meshing Toolbox-а софтвера Femap

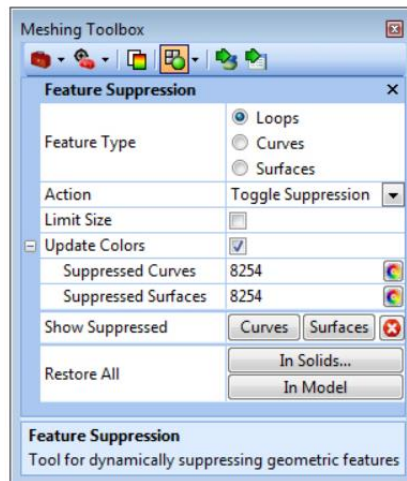
Meshing Toolbox представља сет алата који се примењују при изради мреже модела и едитовању геометрије. Омогућава поједностављење геометрије, комбиновање ентитета, промену величине елемената, померање чворова, као и проверу квалитета елемената и још велики број корисних функција и команди.

Алати за манипулацију геометријом олакшавају процес уклањања сувишне геометрије са CAD модела. Смањује време рада на моделу добрим корисничким интерфејсом и интуитивним алаткама, даје бољу контролу над свим алатима креирања мреже. У поређењу са опцијама које су пандани опцијама из **Meshing toolbox-a**, алати из ове палете захтевају много мање корака до достизања жељене промене на геометрији или мрежи.

Meshing toolbox побољшава тачност резултата анализе кроз бољи квалитет мреже. Визуелни приказ квалитета мреже олакшава кориснику сам процес рада и усмерава процес ка креирању квалитетније мреже. Софтверска подршка подржава брзо процесирање великог броја коначних елемената. [3]

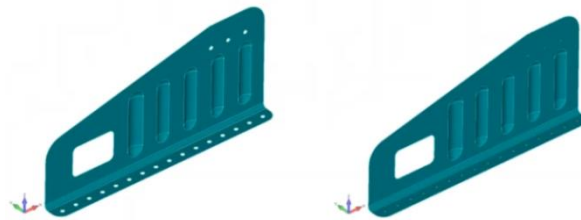
3.1 Feature Suppression

Команда **Feature Suppression** (слика 10) омогућава мануелно уклањање отвора на мрежи модела, кривих и површина које су мале у поређењу са осталом геометријом, при чему уклоњена геометрија постоји на моделу али се при формирању мреже игнорише. Сама геометрија модела се не мења. Командом **Select Entity** или **Dialog Select** унутар **Meshing Toolbox** се може изабрати један или више ентитета. Једна од предност **Meshing Toolbox-a** је управо ова опција која ван палете алата не постоји.

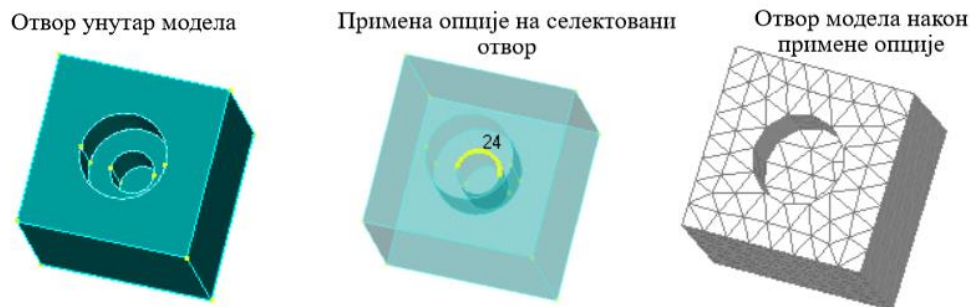


Слика 10: Приказ функције Feature Suppression [3]

Тип геометрије се може изабрати опцијом **Feature Type**, док се коадном **Action** бира функција – уклањање или поновно креирање игнорисаних ентитета (слика 11 и 12). Опцијом **Limit Size** се ограничава величина геометрије, односно отвора мањих од задате димензије, кривих мањих од одређене дужине и површина мањих од задатих. Опција приказује геометрију у позадини мреже, док **Update Colors** омогућава визуелни приказ геометрије задавајући боју ентитету, како би се указало да се при изради мреже није променила геометрија. **Show Suppressed (Curves, Surfaces, and Cancel buttons)** означава „хајлајтује“ криве и површине за уклањање. **Restore All (In Solids and In Model buttons)** враћа на првобитно стање модел.



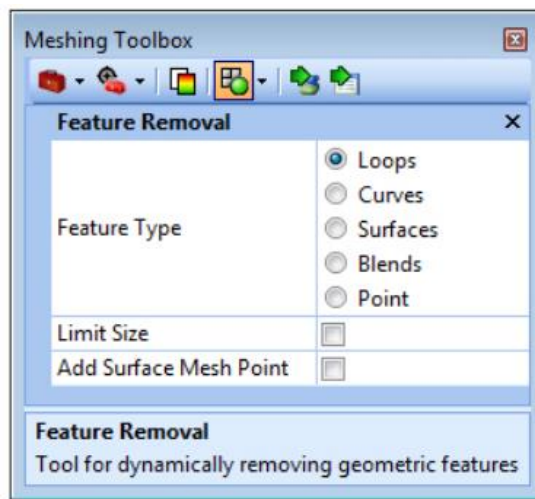
Слика 11: Примена команде Feature Suppression [3]



Слика 12: Уклањање отвора са мреже модела [3]

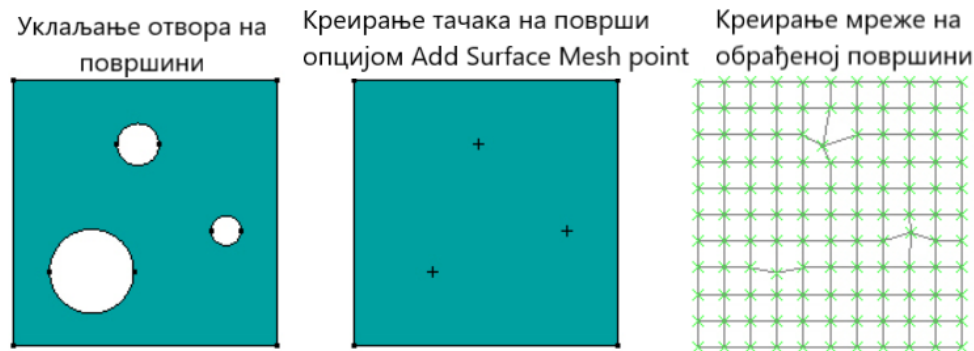
3.2 Feature Removal

Један од применљивијих и функционалнијих алата у овој палети је **Feature Removal** (слика 13). Опцијом се трајно уклања геометрија у коју спадају криве (curves), радијуси, закошења, отвори, површине, сувишне тачке или више ентитета одједном на површини или солиду. Ван **Meshing Toolbox**-а, опцију са сличним функцијама је могуће пронаћи у менију **Delete > Geometry** при чему ће селектовани ентитети бити уклоњени са геометрије. Отворе је могуће уклонити опцијом **Geometry, Surface, Remove Hole**, површине се могу обрисати опцијом **Geometry, Solid, Remove Face** а криве **Geometry, Solid, Cleanup**.



Слика 13: Опција Feature Removal [3]

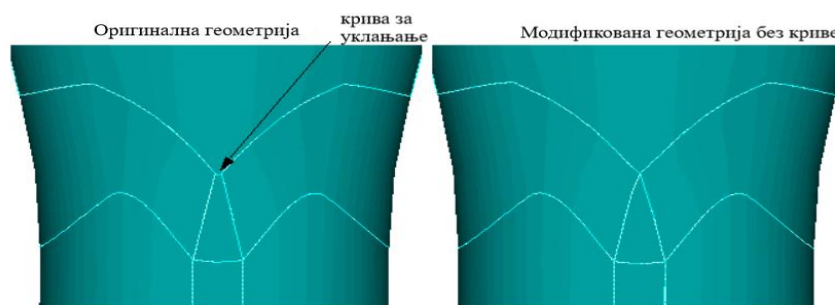
При уклањању отвора (**loops**) може се активирати опција **Add Surface Mesh Point** (слика 14) услед које ће се у центру отвора који се уклања формирати тачка, тј. чвор на мрежи модела. Опција **Limit size** има исту функцију као у **Feature Suppression**.



Слика 14: Примена опције Add Surface Mesh Point [3]

Aggressive Removal је опција за „насилно“ уклањање геометрије која се ређе користи и то у случају уклањања геометрије површина и кривих (слика 15).

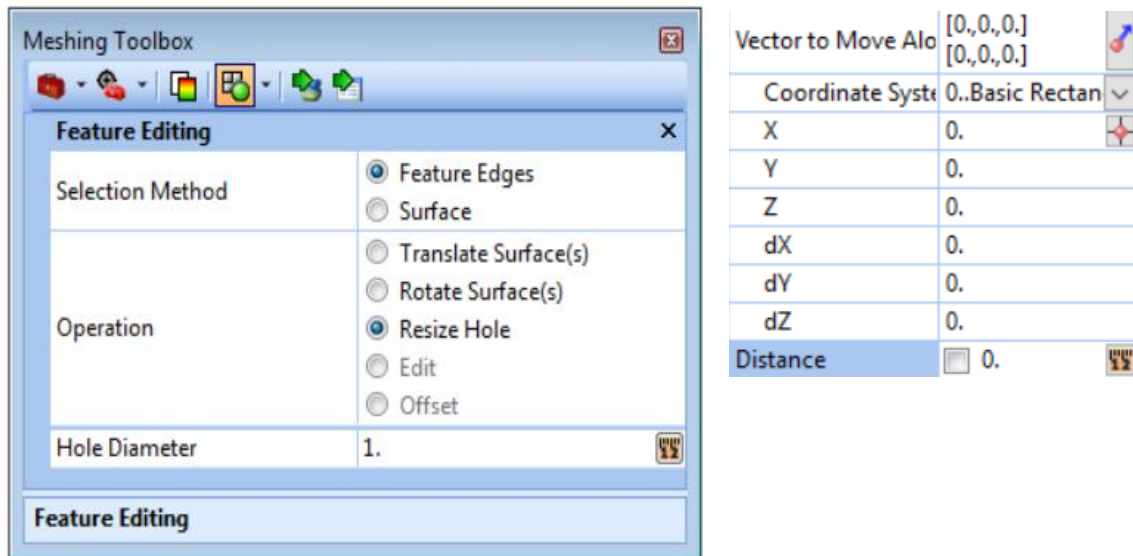
Резултат ове наредбе корисник не може увек предвидети, па је потребно бити опрезан при коришћењу исте. При уклањању, геометрија око селектоване криве може да се деформише како би се прилагодила геометрији након уклањања те криве.



Слика 15: Примена опције Aggressive Removal [3]

3.3 Feature Editing

Команда служи за базичне промене на геометрији као што су: померање/ротирање површина, модификовање рупа, испупчења, ребара, промена величина отвора, *offset*-овање површина и едитовање истих. Бенефит ове опције поред уштеде времена је и то што се са променом геометрије мења и мрежа на моделу (слика 16).

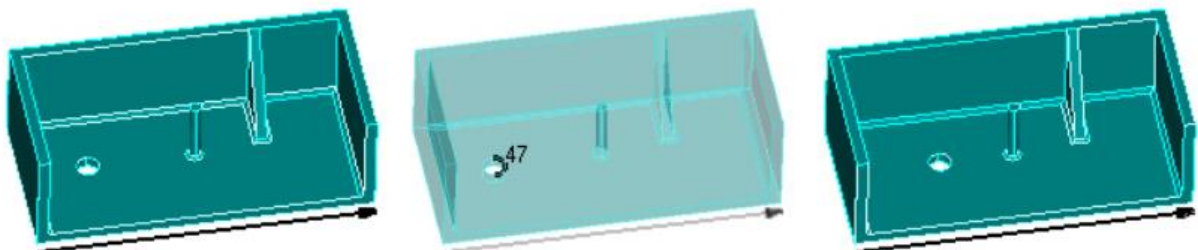


Слика 16: Приказ прозора Feature Editing [3]

У оквиру опције **Selection Method** се обезбеђује одабир жељеног ентитета. Командом **Feature Edges** се дозвољава само одабир отвора и рупа, док опција **Surface** дозвољава одабир већег броја површина који сачињавају солид.

Опција **Operation** омогућава модификовање кроз транслацију и ротацију, уз то је могуће повећавати и смањивати обим рупа, а површине на солиду се могу офсетовати за одређену дужину.

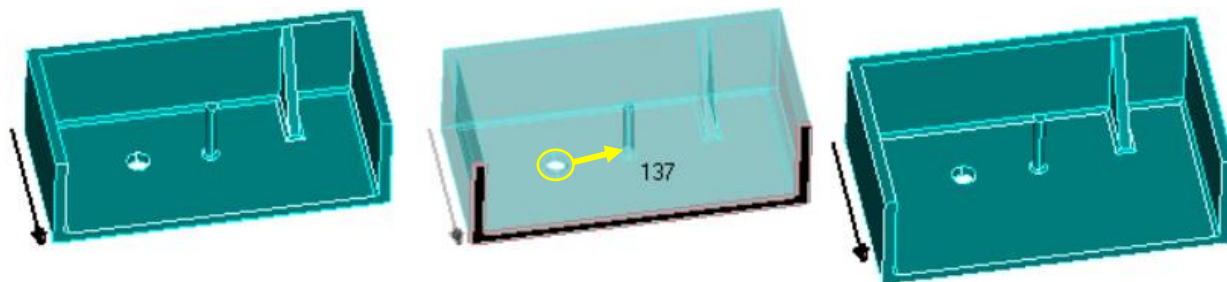
- **Translate Surface(s)** – овом операцијом је могуће померити читаве ентитете, као што су рупе, отвори, ребра, закривљења, испупчења и сл. Померање се може извршити на два начина: задавањем вектора правца померања и дужине. На исти начин је могуће променити дебелину зида, истањити или повећати, одабиром површине и вектора правца.



Слика 17: Демонстрација опције Translate Surface(s) [3]

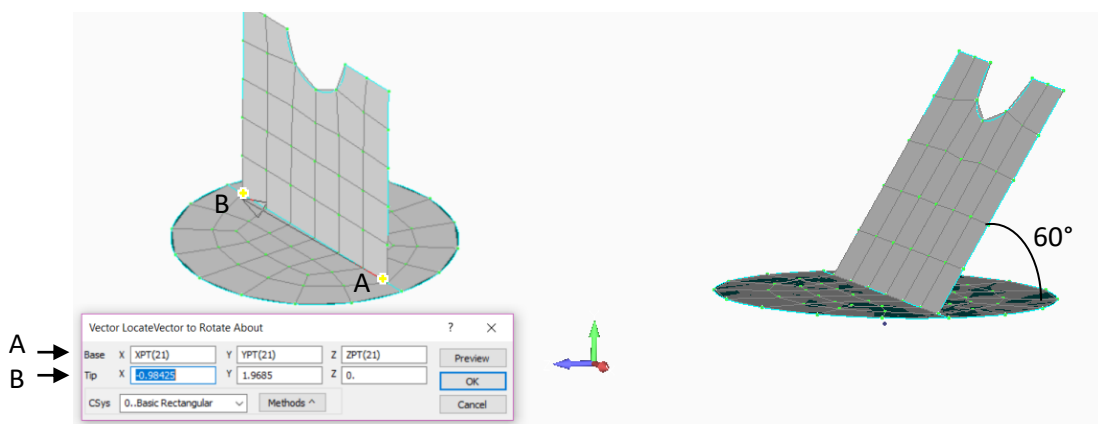
На слици 17 је приказана транслација отвора по једној оси. Најпре је селектован отвор опцијом **Feature Edges**, задат вектор правца по једној оси и задата дужина померања.

Исти поступак је примењен и за екструдовање: одабир вектора и растојања и на крају површине. Крајњи резултат је површина повећана за задато растојање (слика 18).



Слика 18: Продужење површине употребом Translate Surface(s) [3]

- **Rotate** – опција се користи за ротацију читавог ентитета, као што су рупе или испупчења, задавањем вектора ротације и угла заокретања у пољу **Angle** опције унутар команде **Feature Editing**.

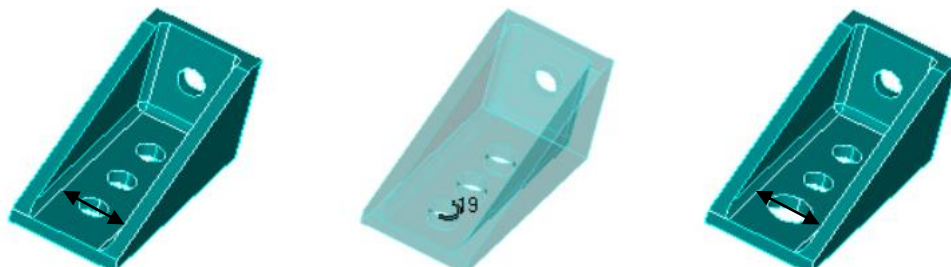


Слика 19: Употреба опције Rotate

Ротација на моделу у примеру започиње одабиром вектора око којег се врши ротирање, у овом случају су као почетна и крајња тачка вектора изабране тачке А и В. Уколико бисмо одабрали правац вектора од тачке В ка тачки А, површина би се ротирала на супротну страну поштовањем правила десног триедра равни. Затим је унет угао од 30° и одабрана површина. Резултат је површина нагнута под углом од 60° од хоризонтале (слика 19).

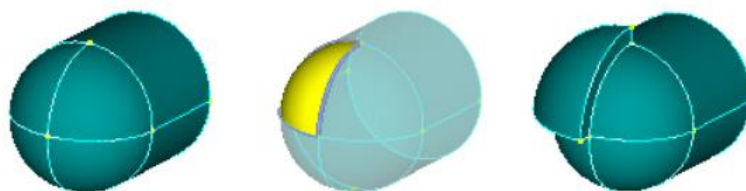
Опција омогућава и ротирање две паралелне површине које образују солид, при чему је поступак исти али се морају одабрати обе површине.

- **Resize Hole** – опција се користи при манипулацији рупа/отвора у солиду и на површинама. У пољу **Hole Diameter** унети пречник и селекувати једну криву. Опција ће радити само уколико је селекувано **Feature Edges**. Као резултат ће се добити отвор/рупа већих или мањих димензија од полазног. Додатно за мерење пречника рупа постоји опција **Measure Distance** (слика 20).



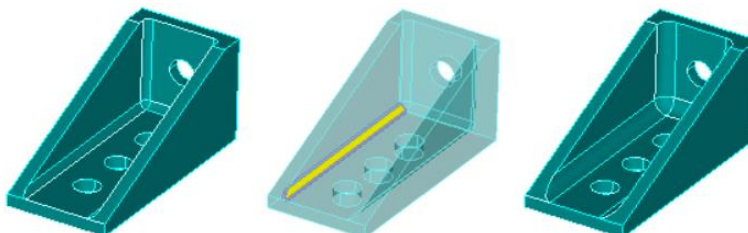
Слика 20: Примена опције Resize Hole [3]

- **Edit** – команда се користи при манипулацији површина облика сфере и цилиндра. Опција ће радити само уколико је селекувано **Surfaces** као метод одабира. Потребно је задати вредност у пољу **Value**, где се при селекувању површина мења њихов радијус. Опцијом **Auto Extend** се аутоматски бирају све површине на ентитету (слика 21).



Слика 21: Примена опције Edit [3]

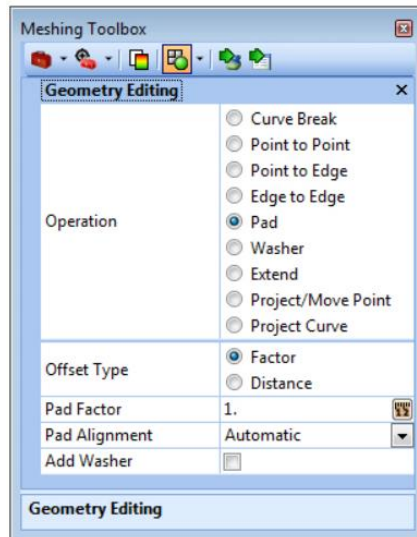
- **Offset** – опција се користи да би се офсетовала површина на солиду и доступна је када је метод **Surface** активан. Принцип је исти као код едитовања, уноси се вредност која може бити позитивна или негативна. У првом случају површина ће се офсетовати „изван“ солида, док ће се у другом случају офсетовати „унутар“ солида. Опција **Auto Extend** има исту улогу као при едитовању (слика 22).



Слика 22: Примена опције Offset [3]

3.4 Geometry Editing

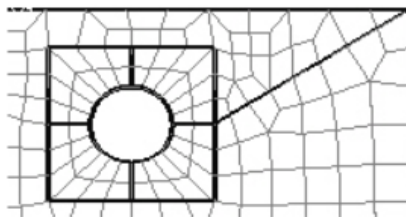
Наведени алат се употребљава при модификовању кривих и површина како би се креирала геометрија за сврху боље мреже и квалитетнијих елемената. Опција утиче и на мрежу, па се са поделом аутоматски обнавља и сама мрежа. Разлика између ове и опција **Modify > Break** и палета алатки **Geometry** је у аутоматском ажурирању мреже. Опција **Break Curve** има више метода за пресек криве и лакша је за манипулацију, али при свакој промени је потребно обновити мрежу (слика 23).



Слика 23: Палета алата Geometry Editing [3]

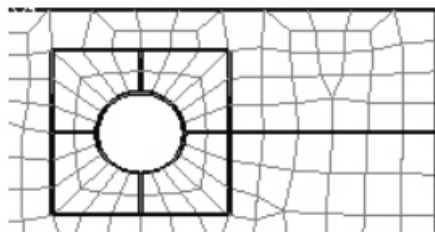
Operation – одређује методу којом ће се поделити или модификовати криве или површине. Већину следећих опције је могуће пронаћи у палети "**Geometry, Curve - From Surface...**".

- **Curve Break** – користећи ову опцију могуће је поделити криву у одређеној тачки уношењем XYZ координата. Уколико се задате координате тачке не налазе на криви тачка се пројектује на криву, у којој се крива дели и креира се тачка пресека. Замена за ову опцију је "**Modify, Break, At Location...**".
- **Point to Point** – селектовањем две тачке на површини креира се линија која их повезује, прати и дели површину (слика 24).



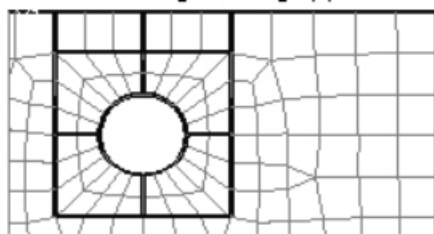
Слика 24: Примена опције Point to Point [3]

- **Point to Edge** - селектовањем тачке и ивице/криве на површини креира се линија која представља најкраће растојање између наведених ентитета (слика 25).



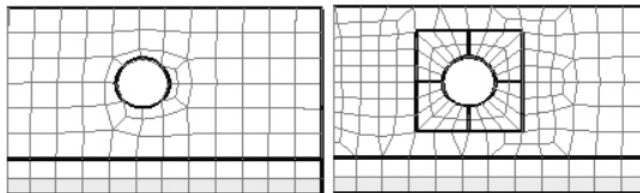
Слика 25: Примена опције Point to Edge [3]

- **Edge to edge** (слика 26) – након одабира прве (референтне) криве/ивице бира се једна или више секундарних кривих/ивица. На основу постојећих тачака на секундарној ивици софтвер аутоматски креира тачке на референтим ивицама, пројектујући тачке са секундарне ивице на референтне ивице (на најкраћем растојању).



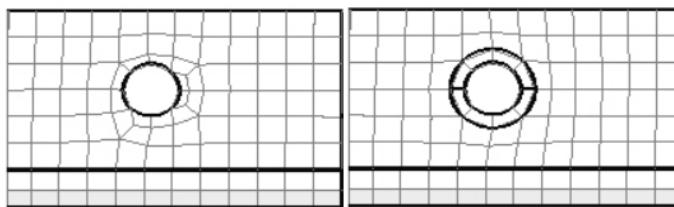
Слика 26: Примена опције Edge to Edge [3]

- **Pad** – опција омогућава лакше креирање мреже око отвора креирајући „шаблон“ око отвора при чему је мрежа повезана са осталом мрежом модела. Шаблон представља квадрат удаљен од центра отвора за неку вредност при чему су централне тачке квадрата и круга спојене линијама у четири тачке (на 0° , 90° , 180° и 270°). Раздаљина круга и квадрата је одређена опцијама **Factor** или **Offset Distance**. Опција **Factor** користи пречник рупе/отвора помножен са унетом вредношћу како би се подесила величина шаблона, док опција **Offset Distance** користи задату вредност за креирање шаблона. Опцији **Pad** (слика 27) се може додати **Washer** при чему се креира прстен око рупе/отвора.



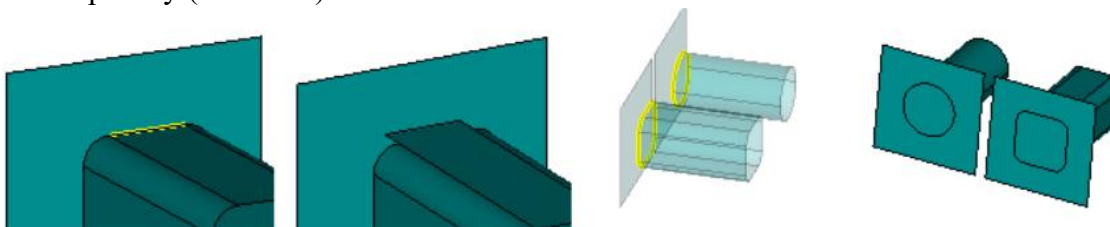
Слика 27: Опис опције Pad [3]

- **Washer** – команда садржи исте опције као претходна: **Factor** или **Offset Distance**. Разлика у односу на **Pad** је у шаблону који је кружан (слика 28).



Слика 28: Примена опције Washer [3]

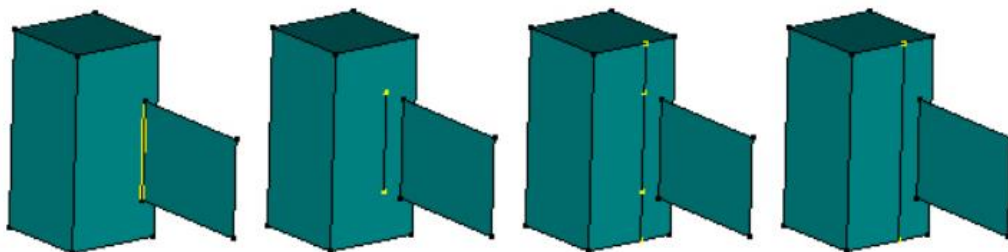
- **Extend** – опција која је од велике помоћи након креирања средњих површина. Опцијом **Extend** се могу продужити криве или површине до одређене површине или се од криве може направити површина (екструдовати криву). Могуће је продужити ентитет до одређене површине, солида, растојања или локације. Активирањем опције **Single Surface Mode** омогућава се продужење криве само на једну површину, док опција **Surface to Extend to** дозвољава одабир већег броја површина. Опција не постоји ван **Meshing Toolbox**-а већ је површине потребно мануелно нацртати у софтверу. Треба напоменути, као што је приказано на последњој слици у низу, да се при екстендовању криве пројектују на површину док је при опцији **Extrude** потребно и испројектовати криве на површину (слика 29).



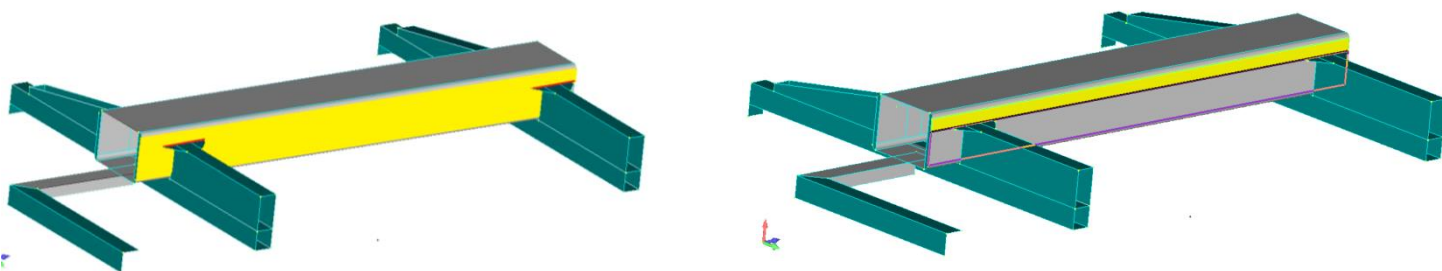
Слика 29: Примером објашњена опција Extend [3]

- **Project/Move Point** – овом опцијом је могуће пројектовати тачку која је део неког ентитета на другу тачку, криву, површину или солид при чему долази до деформације оригиналног модела.
- **Project Curve** – командом је могуће испројектовати криву по нормали на селектованој површини. Уколико је потребно селектовати више крива одједном, користити опцију **Dialog Select**. При пројектовању постоје три опције : **Imprint**, **Imprint, Extend** и **Imprint, Extend, Clean**. Опцијом **Imprint** крива ће се само пројектовати на селектовану површину, при коришћењу опције **Imprint, Extend** крива ће се пројектовати и пружати дуж читаве површине при чему ће тачке на криви постојати и на њеној пројекцији. На крају, опција **Imprint, Extend, Clean** функционише исто као и претходна при чему на пројекцији не постоје

тачке потекле од оригиналне криве (слика 30). При пројектовању криве дуж целе површине, долази до поделе површине на том месту.



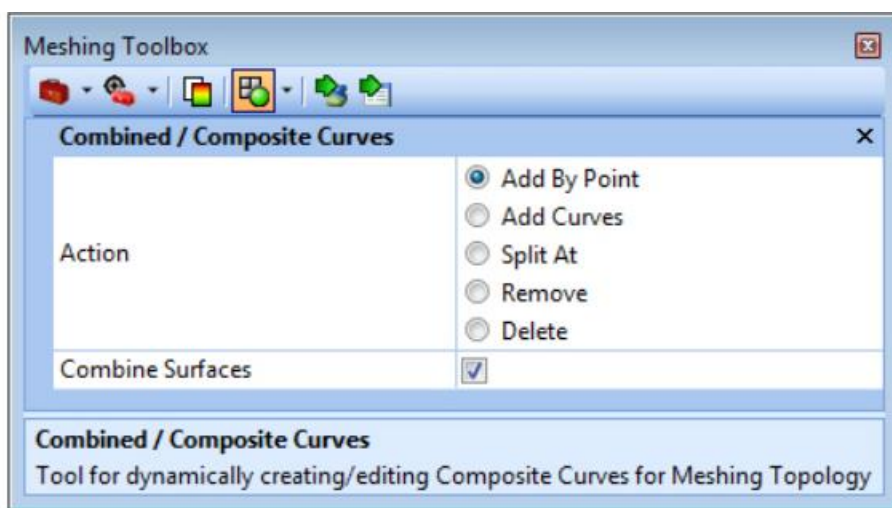
Слика 30: Приказ свих опција команде Project Curve [3]



Слика 31: Примена опције Project Curve на реалном моделу

3.5 Combined/Composite Curves

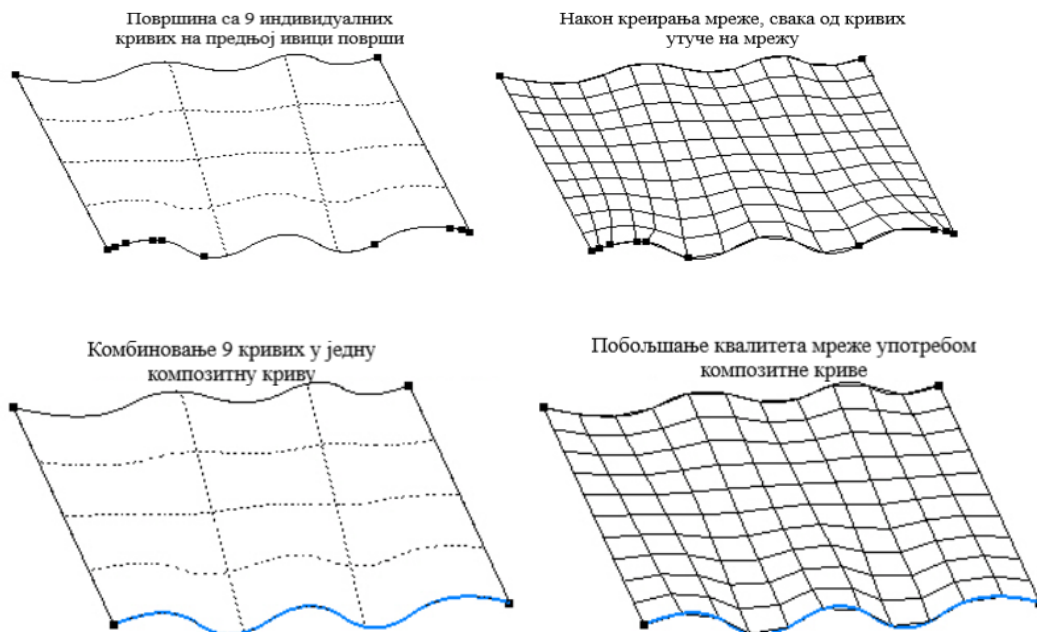
У неким случајевима, комбиновањем више мањих крива у једну дуж ивице површине може побољшати квалитет мреже. Одабиром кривих или тачке којом спаја две криве могуће је извршити функцију (слика 32).



Слика 32: Изглед прозора команде Combined/Composite Curves [3]

Опцијом **Action** се одређује како се одређене криве комбинују како би се добиле нова крива која је спој првобитних – у даљем тексту композитна крива (**Composite Curves**) или обратно (опције **Add by Point** или **Add Curves**), како да се од новонастале криве добију првобитне (опције **Split At** или **Remove**). Такође, опцијом **Delete** је могуће потпуно обрисати новонасталу криву, при чему је ова опција ефикаснија од коришћења **Delete, Geometry, Curve**.

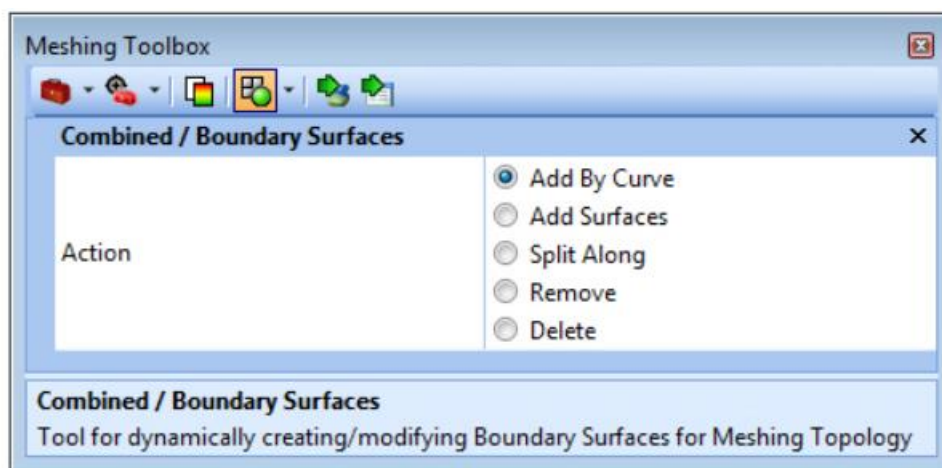
- **Add by Point** – комбинује две криве спојене у одређеној тачки (која се селекује) у нову (композитну) криву. Уколико постоји више мањих кривих дуж ивице, могуће је кликом на низ тачака између кривих креирати једну криву.
- **Add Curves** – опција креира композитну криву одабиром појединачних кривих. У оквиру ове опције постоји још четири подопције: **Merge to Existing**, **Add Short Curves**, **Add to Branch**, **Combine Surfaces**. Опција **Merge to Existing** омогућава продужење композитне криве одабиром нових кривих које јој се аутоматски додају. Опција **Add Short Curves** додаје само оне криве које су мање дужине од задате. **Add to Branch** дозвољава одабир једне криве од које ће настати композитна крива која ће бити распрострањена (разграната) све до ивице површине. Опција **Combine Surfaces** креира површину од више површина које садрже криве од којих је састављена композитна крива (слика 33).
- **Split At** – омогућава одабир тачке у којој ће се композитна крива поделити на два дела.
- **Remove** – команда омогућава уклањање било које криве која сачињава композитну криву. Уколико се уклони крива први крају, композитна крива ће се само скратити, док при уклањању средишњих крива долази до модификовања композитне криве у смислу њеног дељења и размака на месту уклањања.
- **Delete** – опција дозвољава потпуно брисање композитне криве, при чему првобитне криве и даље постоје на моделу.



Слика 33: Утицај команде Combined/Composite Curves на мрежу [3]

3.6 Combined/Boundary Surfaces Tool

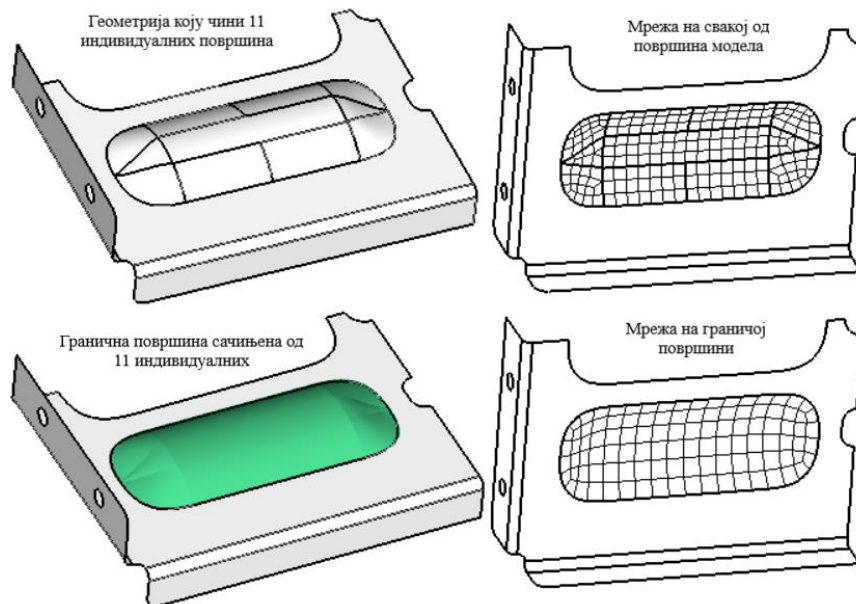
Слично као и при креирању „композитних кривих“ да би се побољшао квалитет мреже, погодно је комбиновати више површина у једну тзв. граничну површину (**Boundary Surface**). Опција је погодна када постоје површине малих димензија наспрам много већих површина. Комбиновањем више површина у једну граничну, све унутрашње криве се могу занемарити при креирању мреже на моделу. Граничне површине се могу креирати селектовањем кривих које припадају већем броју површина или одабиром саме површине (слика 34 и 35).



Слика 34: Изглед прозора команде Combined/Boundary Surfaces Tool [3]

Идентично као и код претходне команде, опција **Action** одређује како се одређене криве комбинују како би формирале граничну површину (**Add by Curve** и **Add Surfaces**) или како се иста може поделити на првобитне. Опцијом **Delete** је могуће потпуно обрисати граничну површину.

- **Add by Curve** – опцијом се комбинују две површине које деле једну криву како би се формирала гранична површина. Уколико се селекује крива граничне површине, а коју садржи и површина ван ње, поменута површина ће бити додата граничној као једна од фундаменталних.
- **Add Surfaces** – команда омогућава креирање граничне површине одабиром индивидуалних површина. Уколико је омогућена опција **Merge to Existing**, површина ће бити део постојеће граничне површине уколико постоје заједничке криве.
- **Split Along** – омогућава одабир крива које ће поделити граничну површину на два дела.
- **Remove** – омогућава уклањање неке од фундаменталних површина граничне површине.
- **Delete** - опција дозвољава потпуно брисање граничне површине, при чему првобитне/фундаменталне површине и даље постоје на моделу

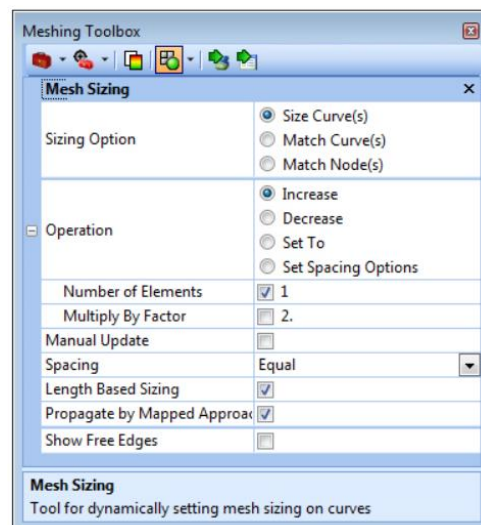


Слика 35: Примена команде Combined/Boundary Surfaces Tool [3]

3.7 Meshing Tools

3.7.1 Mesh sizing

Наведени алат (слика 36) представља комбинацију опција чија је функција да подесе величину мреже и размак између чворова. Неке од опција је могуће пронаћи на **Mesh**, **Mesh Control**.



Слика 36: Изглед прозора команде Mesh sizing [3]

Sizing Option – опција омогућава одабир метода, **Size Curve(s)** или **Match Curve(s) / Node(s)**, којим ће се подешавати подела на кривама.

- **Size Curve(s)** – овај метод комбинује селектовану опцију у прозору **Operation** са одређеном опцијом у прозору **Spacing** како би се креирала подела на кривој.
- **Match Curve(s) / Match Node(s)** – коришћењем ове методе могуће је одабрати криву која ће имати поделу или чворове као на назначеној кривој.

Operation – команда омогућава одабир методе за манипулисање бројем елемената тј. поделе на кривама. Међу методама за одабир су **Increase** и **Decrease** помоћу којих се повећава или смањује број елемената на кривој, при чему се опцијом **Number of Elements** задаје за колики број елемената ће се променити подела на кривој. За разлику од претходне методе где се додаје или одузима број елемената, опцијом **Set To** се одређује тачан број елемената на кривој задавајући конкретан број елемената у пољу **Number of Elements**. Метод **Set Spacing Options** подразумева промену растојања између чворова при чему не долази до ремећења броја чворова. Олакшица коју пружа ова команда су управо **Increase** и **Decrease** које повећавају или смањују поделу на кривој само једним кликом. Употребом опција сличне функције, потребно је унети број елемената на кривој, затим селектовати површину. Овом опцијом је смањен број корака, смањено време израде и омогућено брже креирање жељене поделе на кривој.

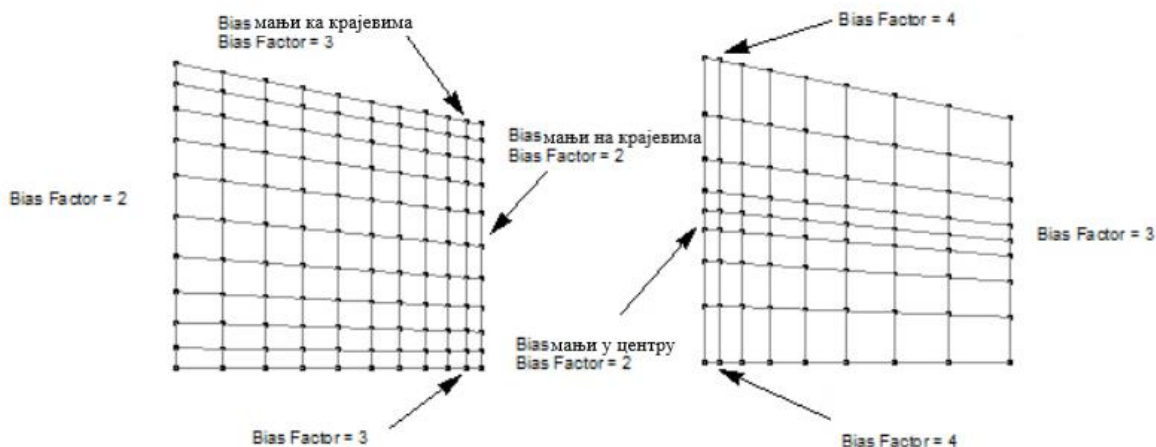
Manual Update - омогућавањем ове команде, све претходно наведене методе везане за промену броја елемената или растојање између чворова се неће аутоматски обнављати при свакој промени све док се не активира дугме **Apply Operation**. Одабиром дугмета “**#’ Curve(s) Selected**” селектоване криве ће бити означене („хајлатоване“), док кликом на дугме **Clear Selection** се број селектованих криви своди на нулу.

Spacing – овом опцијом је могуће одредити растојање. Подразумевана метода је **Equal** при чему је једнако растојање међу чворовима дуж криве, док ће се осталим методама модификовати растојање уз помоћ опције **Bias Factor** (слика 37).

- **Biased, use Pick Location** – растојање између чворова криве ће се при овој методи модификовати помоћу позиције курсора на селектованој кривој.
- **Biased, Small Elements at Ends** – опција класификује елементе тако што ће елементи са мањим чворним растојањем бити по крајевима кривих, док ће они са већим растојањем заузимају средишње делове криве.
- **Biased, Small Elements at Center** – опција је идентична претходној, са изменом да су сада елементи са малим растојањем бити централни док ће они са већим заузимају крајеве кривих.
- **Biased, Use Location** – елементи са мањим чворним растојањем ће бити позиционирани близу тачке на селектованој криви одабраној опцијом **Bias Location** (XYZ координате).

Bias Factor – опција унутар команде Spacing представља однос највећег и најмањег растојања између чворова дуж криве. На пример, уколико је фактор једнак 2, највеће растојање је једнако најмањем помножено са два.

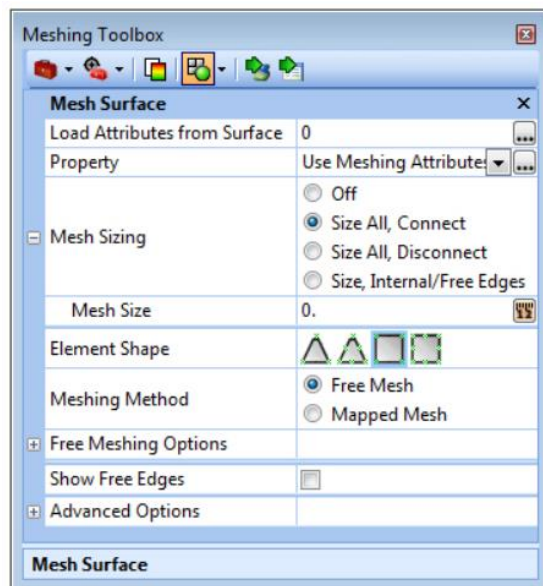
Show Free Edges – приказује („хајлајтује“) слободне чворове на моделу.



Слика 37: Изглед прозора команде Mesh surface [3]

3.7.2 Mesh Surface

Алат (слика 38) се користи за креирање мреже на већем броју површина на моделу. Алат представља комбинацију опција **"Mesh, Geometry, Surface..."**, **"Mesh, Mesh Control, Approach On Surface"** и **"Mesh, Mesh Control, Attributes On Surface"**.



Слика 38: Примена опције Bias [3]

Load Attributes from Surface – опција се користи за одабир површине којој су додељени одређени атрибути - **Mesh Attributes**, затим су исти учитани у **Mesh Surface** алат. Одабир површине се може извршити помоћу ID-а или кликом на дугме “...” а затим и мануелним одабиром површине.

Property – команда дозвољава одабир постојећег пропертија (**Property**) како би се креирала мрежа на моделу или модификовала постојећа.

Mesh Sizing – опције унутар ове команде служе за дефинисање понашања и утицаја мреже на селектованим површинама и површинама повезаним са селектованом при процесу креирања и обнављања мреже (**meshing/remeshing**).

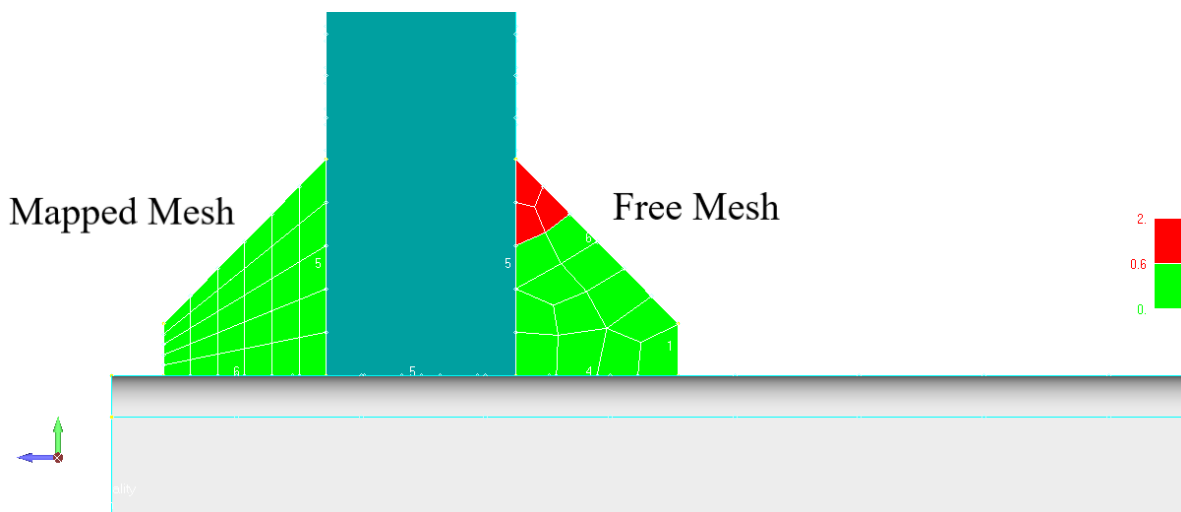
Опцијом **Mesh Size** је могуће унети директно величину елемента или је могуће измерити опцијом **Measure**. Опцијом се добијају исте вредности као и применом опције **Mesh, Mesh Control, Size on Surface**. У оквиру команде постоје још четири опције: **Off, Size All Connect, Size All Disconnect, Size Internal/Free Edges**.

- **Off** – опцијом се могу изменити облици елемента и начин на који се креира мрежа.
- **Size All, Connect** – опцијом се мења подела кривих које су део селектоване површине користећи задату величину елемента **Mesh Size**, затим креира/обнавља мрежу помоћу опција већ подешених у алату **Mesh Surface**. Опција обнавља величину елемента на свакој кривој која је повезана са том површином.
- **Size All, Disconnect** – принцип је истоветан као код претходне опције, са разликом да се не мења мрежа на околним површинама које су повезане кривама са селектованом.
- **Size, Internal/Free Edges** – при активирању напоменуте опције долази само до промена на слободним ивицама селектоване површине. Криве које у контакту са селектованом површином ће остати нетакнуте.

Element Shape – опција омогућава одабир врсте коначних елемената, при чему је сваки од четири типа елемента графички приказан. Могуће је одабрати тетре (троугаоне елементе) са (6 чворова) и без међучворова (3 чвора) при чему је боље одбрати тетре са међучворовима због даљих прорачуна и валидности резултата, док су са друге стране хексе (четвороугаони коначни елемент) са међучворовима који има 8 чворова и без међучворова (4 чвора).

Meshing Method - садржи две опције: **Free Mesh** и **Mapped Mesh**. Опција сједињује више команди, у које спадају опције унутар **Mesh, Geometry, Surface** (омогућава манипулацију мрежом и елементима: тип коначног елемента, додавање пропертија, међучворова и слично), затим и **Mesh, Mesh Control, Size On Surface** (служи за одређивање величине елемента, минималан број елемената на ивицама, толеранције ...), **Mesh, Mesh Control, Approach On Surface** (опција ван **Meshing Toolbox**-а задужена за одабир врсте мреже креиране на површини).

Разлику између опција **Free Mesh** и **Mapped Mesh** је најлакше објаснити на примеру. У овом случају је то ребро које садржи оштре углове што га чини неподобним за правилно креирање мреже.



Слика 39: Разлика на мрежи између Free Mesh и Mapped Mesh

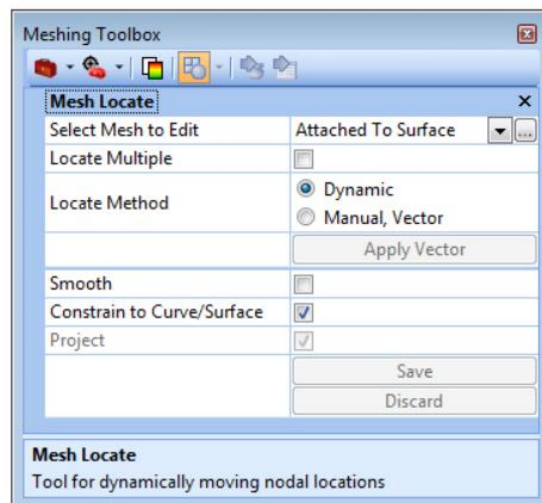
Са слике 39 се може уочити разлика између мреже направљене методом **Free Mesh** и **Mapped Mesh**. У овире прве опције софтвер креира мрежу по алгоритму дефинисаном програмом при чему су величине коначних елемената приближно једнаке. Уочава се неправилност на мрежи због оштрих углова на елементима. Са друге стране, мапирана мрежа креира мрежу коначних елемената по узору на мрежу која би се формирала на површини облика квадрата, али са незаобилазним разликама у величини елемената и унутрашњим угловима коначних елемената. Апроксимација мреже се омогућава опцијом **Approach Options > Mapped – Four Corner** и одабиром тачака на површини.

Show Free Edges – опција „хајлајтује“ сваку слободну ивицу на моделу, што може бити од користи при провери поклапања чворова, као и да ли је мрежа повезана и након њеног поновног креирања на површини.

3.8 Mesh Editing Tools

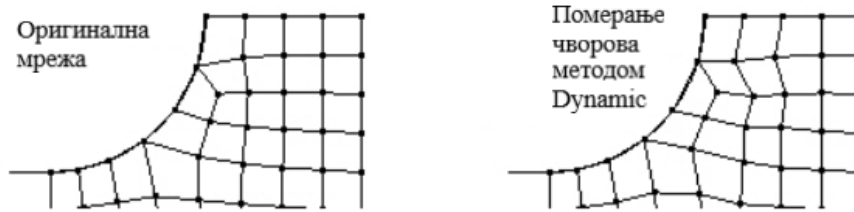
3.8.1 Mesh Locate

Опција омогућава мале промене на постојећој мрежи померајући чворове без промене броја елемената. Алат омогућава померање при чему чворови остају везани за солид, површину или криву. Опција се користи уколико елемент није правилног облика или треба поклопити два чвора. При манипулисању чворовима, могуће је укључити квалитет мреже који у реалном времену и при сваком кораку показује да ли чвор након померања задовољава критеријуме. На крају, могуће је сачувати измене на мрежи или поништити исте и вратити се првобитној верзији мреже (слика 40).



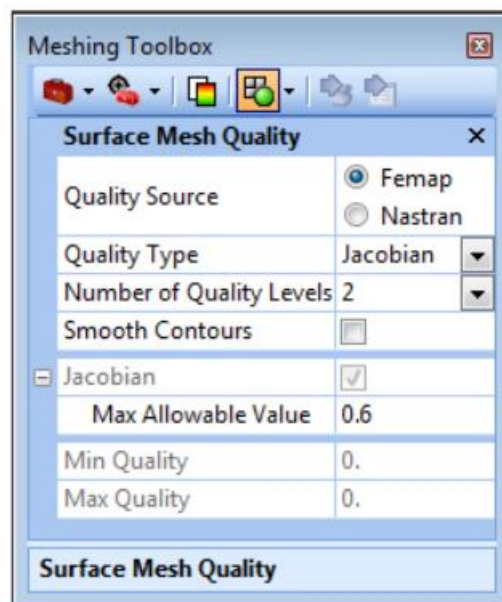
Слика 40: Изглед прозора команде Mesh Locate [3]

- **Select Mesh to Edit** – опцијом се ограничавају елементи чије је чворове могуће померати командом. Кликом на “...” је могуће одабрати ентитет на коме ће доћи до измена, што може бити површина (**Attached to Surface**), солид (**Attached to Solid**) и уколико не постоји геометрија (**Standalone Mesh**).
- **Locate Multiple** – команда омогућава одабир већег броја чворова истовремено. Чворове одабрати појединачно опцијом **Select Entity**, затим ће се они померити у складу са изабраном методом у **Locate Method**.
- **Locate Method** – опција омогућава избор метода за померање (**dynamically/manually**). Уколико се одабере опција **Dynamic** чворови ће се померати све док елемент не достигне жељени квалитет, са друге стране опција **Manual, Vector** омогућава прецизно померање чвора задавањем координата (слика 41).
- **Smooth** – уколико је активна опција, мрежа ће се мењати како би се прилагодила померању чворова.
- **Constrain to Curve/Surface** – активирањем дате опције, чворови везани за криве или површине моћи ће да се крећу само унутар њих.
- **Project** – када је опција активирана, селектовани чворови се пројектују на површину за коју су везани.
- **Save and Discard buttons** – након што су померени чворови, могуће је сачувати измене на мрежи опцијом (**Save**) или их одбацити и вратити се на првобитну (**Discard**).



Слика 41: Примена команде Mesh Locate [3]

Креирање мреже са високим квалитетом елемената је неопходно због тачности и валидности резултата након процесирања. Ова опција омогућава графичко приказивање квалитета елемената (слика 42).



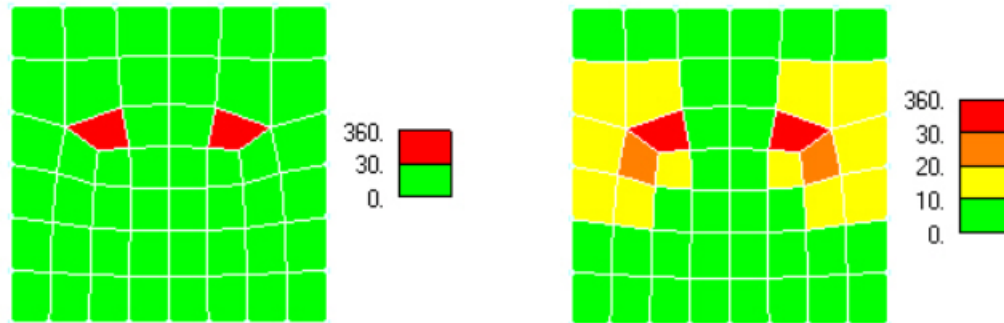
Слика 42: Изглед прозора команде Surface Mesh Quality [3]

- **Quality Source** – опција омогућава одабир између **Femap**-ових или **Nastran**-ових квалитета мрежа (слика 43).
- **Quality Type** – уколико је за изабран сет **Femap**-ових квалитета мреже могуће је бирати између девет различитих типова: **Aspect Ratio**, **Taper**, **Alternate Taper**, **Internal Angles**, **Skew**, **Warping**, **Nastran Warping**, **Jacobian** и **Combined Quality**.

Уколико је у питању **Nastran** тада постоје: **Quad Skew**, **Quad Taper**, **Quad Warp**, **Quad IAMin**, **Quad IAMax**, **Quad AR**, **Tria Skew**, **Tria IAMax** и **Tria AR**.

Најчешће коришћен метод за проверу мреже је **Jacobian**, који ће коришћен и у раду.

- **Number of Quality Levels** – одређује број нивоа за одређивање квалитета елемената који се графички приказују. Може се изабрати два или четири нивоа. Уколико су одабрана два нивоа, сви елементи изнад максималне дозвољене вредности (**Max Allowable Value** која је задата, али постоји могућност промене) за одабрани квалитет ће бити обојени у црвено док ће сви остали бити обојени у зелено. Елементи ће се рангирати од нуле до максималне дозвољене вредности.
- **Min Quality and Max Quality** – даје на увид најбољи и најгори квалитет елемената на селектованој мрежи.



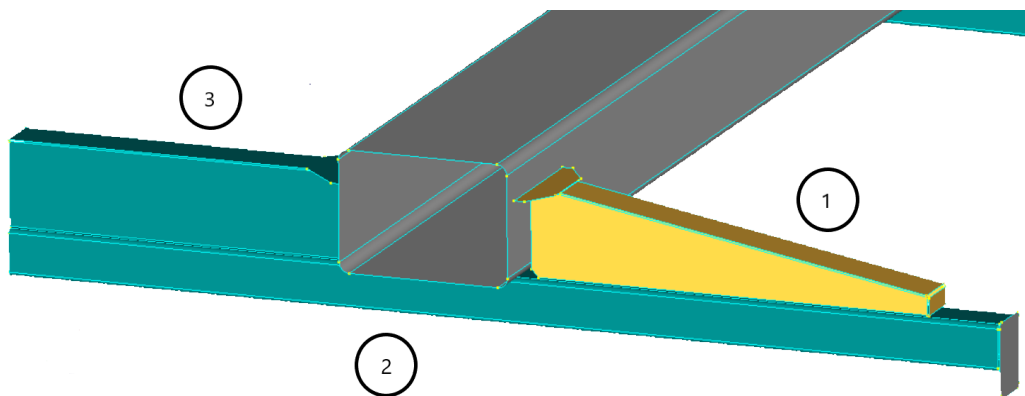
Слика 43: Примена команде Surface Mesh Quality [3]

4. Поступак израде модела и његова анализа

Након израде средњих површина и разматрања команди **Meshing toolbox**-а могуће је дорадити геометрију на моделу, креирати мрежу и на крају извршити анализу.

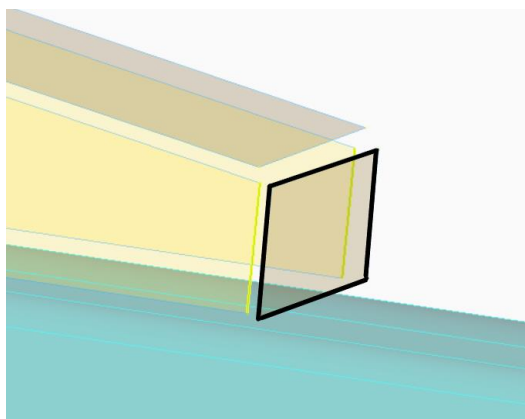
Приликом дорађивања геометрије и екстендовања кривих/површина треба водити рачуна да габаритне мере на моделу остану непромењене.

Редослед модификовања површина на носачу дат је следећом сликом 44:



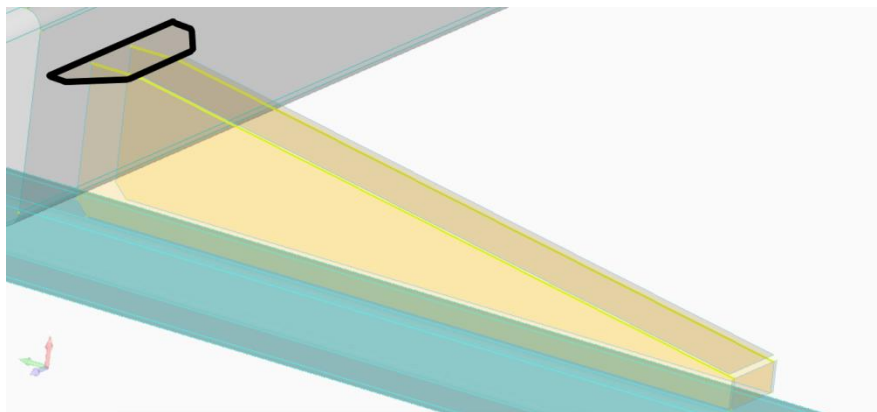
Слика 44: Редослед модификовања површина на моделу

Процес обраде ребра на носачу (слика 45) почиње са продужетком странице правоугаоне површине до косе површине, а затим продужетком бочних страна опцијом **Meshing toolbox - Geometry Editing – Extend** на означену правоугаону површину.



Слика 45: Примена опције Extend

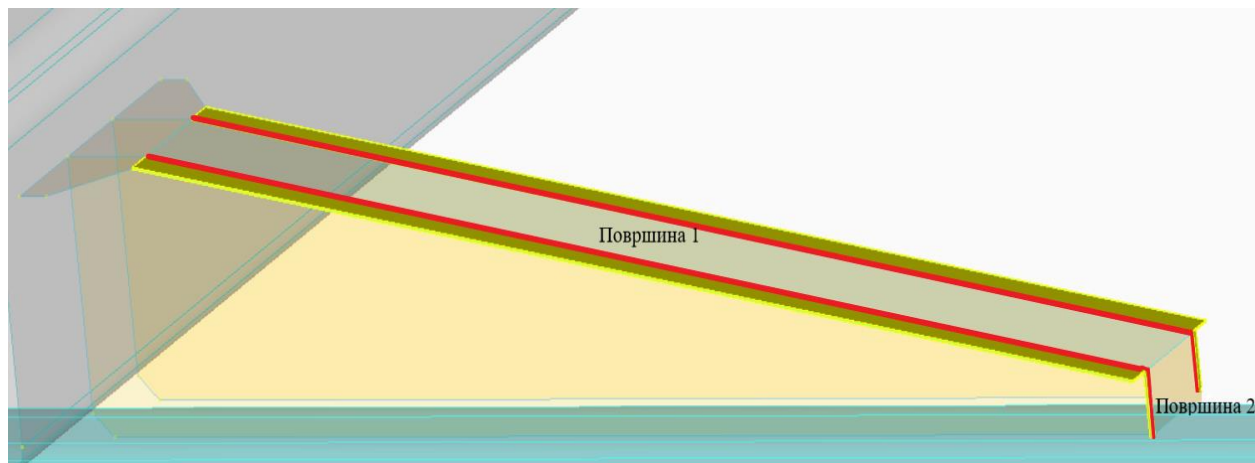
Затим се на горњу, трепазоидну површину (слика 46) екстендују криве са бочних страна тако што се прво одабере површина а затим опцијом **Dialog Select** криве са бочних страна које су у контакту са селектованом површином. Уколико се не би користио алат **Meshing toolbox**-а, крива не би могла да се продужи до површине већ би нужно морале да се нацртају нове површине.



Слика 46: Површина до које је потребно продужити странице

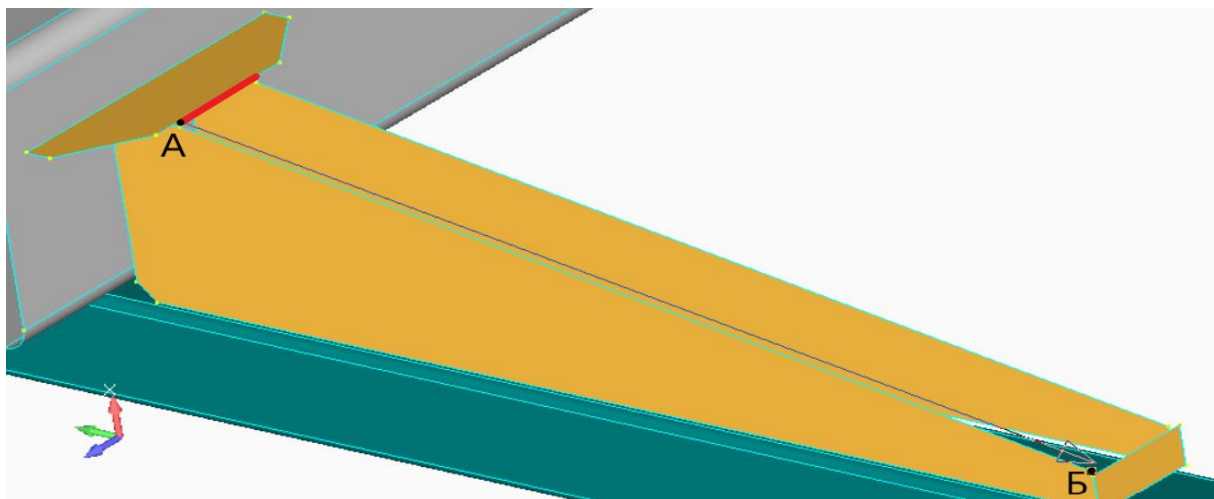
На моделу након обављеног пројектовања и екстендовања постоје одређени вишкови (на слици 47 означени жутом бојом) који ће се уклонити. Најпре је потребно испројектовати заједничке криве (на слици означене црвеном бојом) на површине опцијом **Project Curve –**

Imprint, Extend након чега је могуће обрисати непотребну геометрију са модела опцијом **Feature Removal – Surfaces**. Уколико се не користи **Meshing Toolbox**, користила би се опција **Geometry – Curve from Surface – Project** како би се испројектовале криве на назначене површине а затим се од креирале нове површине (које представљају вишкове) које би касније биле обрисане опцијом **Delete – Geometry – Surface**.



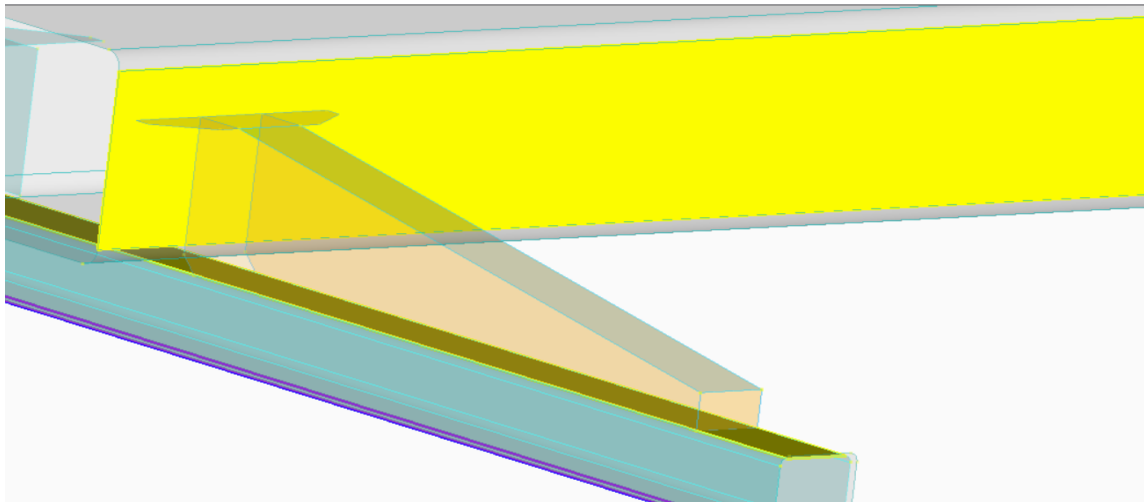
Слика 47: Вишак геометрије на моделу

Након уклањања непотребне геометрије, површина под углом није повезана са остатком геометрије. Повезивање поменуте површине се може извршити на више начина, екстендовањем до површина и слично, међутим, како би се показало више метода потребно је обрисати неведену површину и употребити опцију **Geometry – Surface – Extrude**. Одабиром криве, затим почетне А и крајње тачке Б добија се површина која је повезана са свим околним површинама (слика 48).



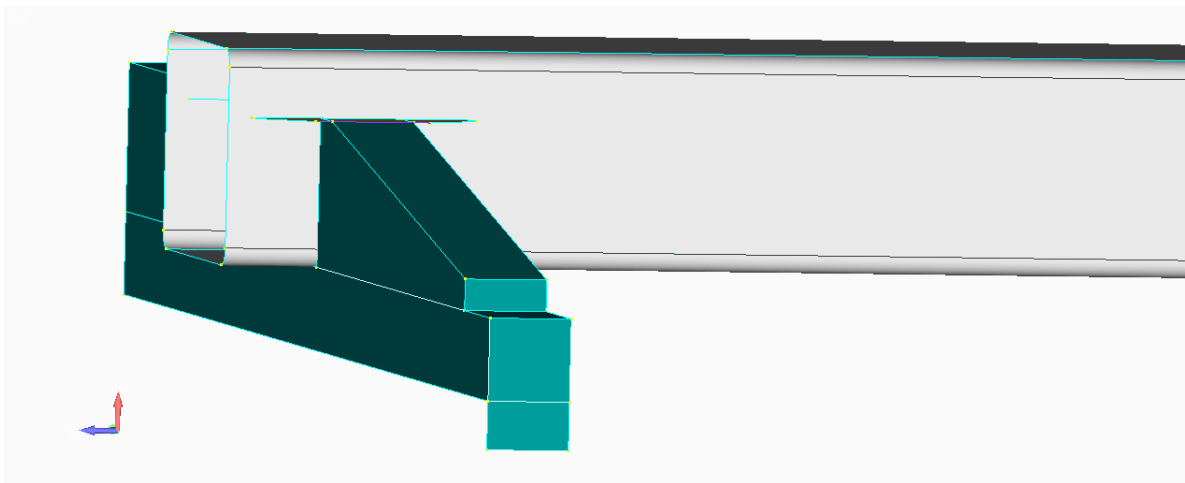
Слика 48: Примена опције Extrude

На крају је је потребно испројектовати странице ребра на уздужни и попречни носач (слика 49).



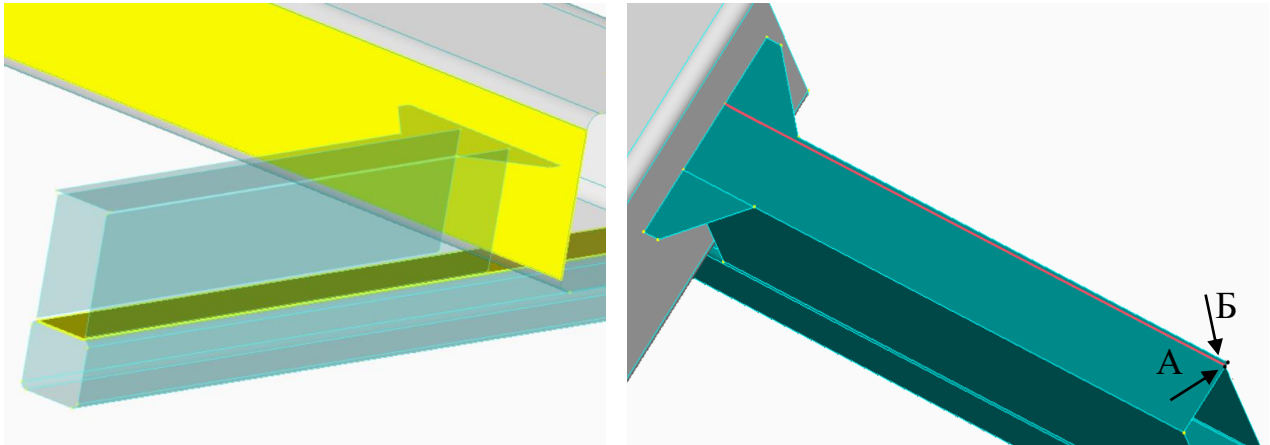
Слика 49: Бочне површине на које је потребно екструдовати ребро

На попречном носачу постоје радијуси који су малих димензија и могу се уклонити опцијом **Feature removal**. Затим и ивице носача продужити до усправне правоугаоне површине (слика 50).



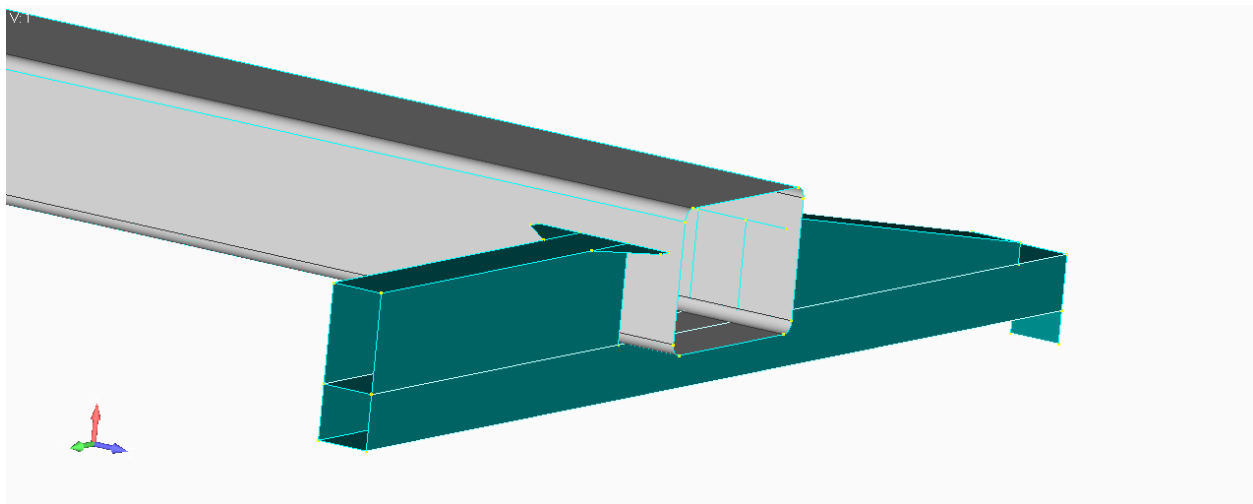
Слика 50: Изглед модела без радијуса

На другом делу овог попречног носача треба екстендовати доње криве на бочним странама до горње површине носача, а горње криве поклопити са трапезоидном површином. Затим поклопити ширину са ширином носача опцијом **Modify – Move by – Curve** при чему ће се одабрати крива и почетна А и крајња тачка Б екструдовања. На крају је потребно још повезати део пројектовањем на уздужни носач (слика 51).



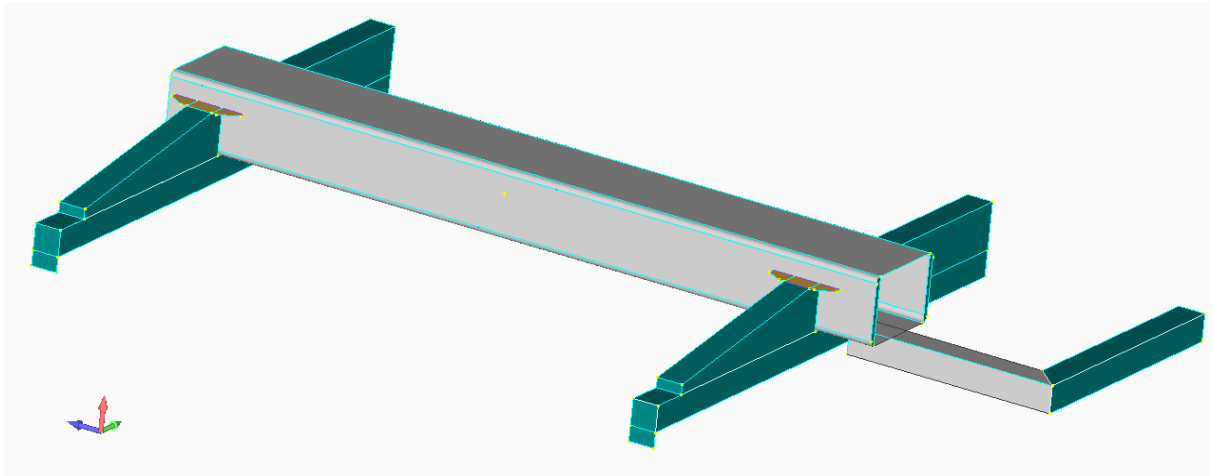
Слика 51: Примена опције Move by

Коначно, да би све површине биле у контакту, потребно је померити уздужни носач ка попречним (слика 52). Геометрија је истоветна на попречним носачима па је потребно је исте поступке применити и на другом попречном носачу. При овом процесу, спојиће се и предњи део – граничник у облику слова П са остатком геометрије.



Слика 52: Коначан изглед ребара и попречног носача на једној страни

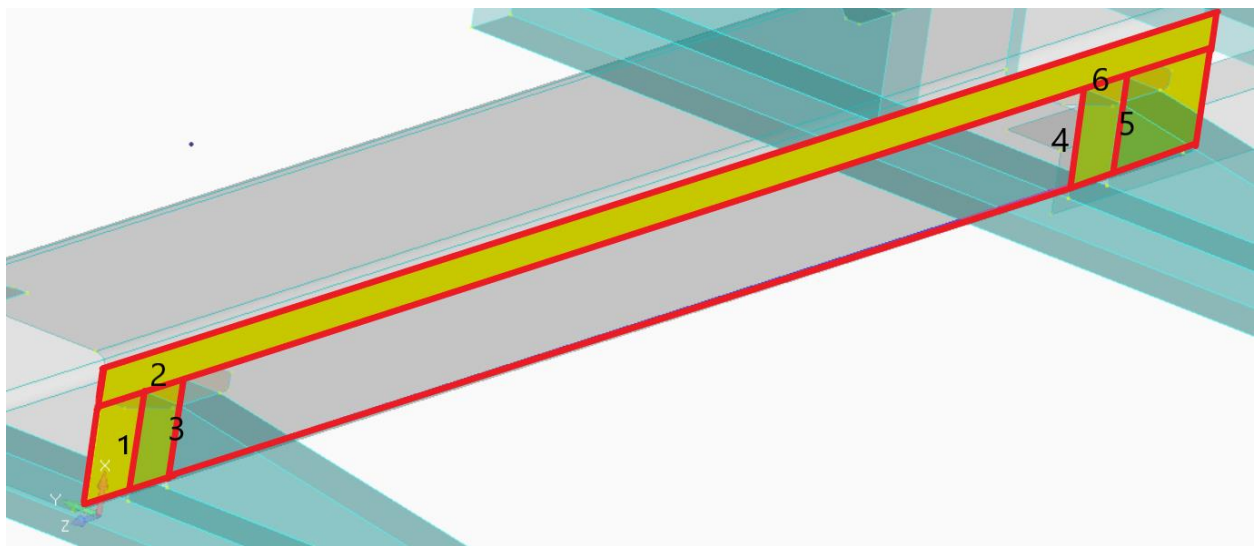
Финални модел средњих површина (слика 53) након примењених опција је спреман за даље манипулисање, креирање мреже и анализу.



Слика 53: Коначан изглед модела средњих површина

Следећи корак је дељење површина ради касније лакше израде мреже на моделу. Наиме, при контакту површина, тј. криву у контакту је некада потребно испројектовати на остатак површине како би се лакше направила мрежа.

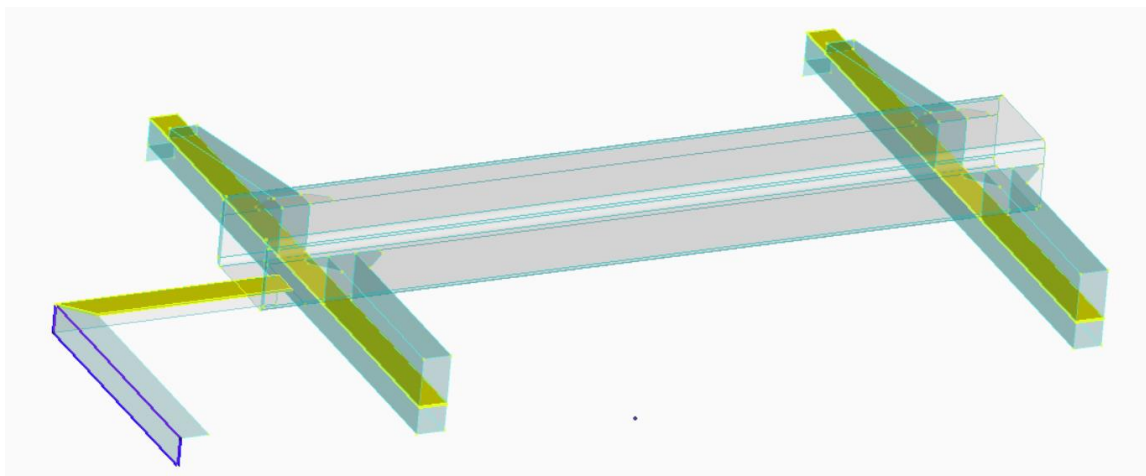
При пројектовању ће се користити опција **Project Curve – Imprint, Extend, Clean**. Најпре је изабрана једна бочна површина а затим и криве (на слици 54 означене бројевима) које ће образовати површине. Тако је од једне бочне површине уздужног носача настало шест нових. Истоветан поступак треба применити и на другој бочној страни.



Слика 54: Приказ селектованих површина и кривих које ће се пројектовати на њих

Потребно је још на доњој површини уздужног носача испројектовати криве других површина.

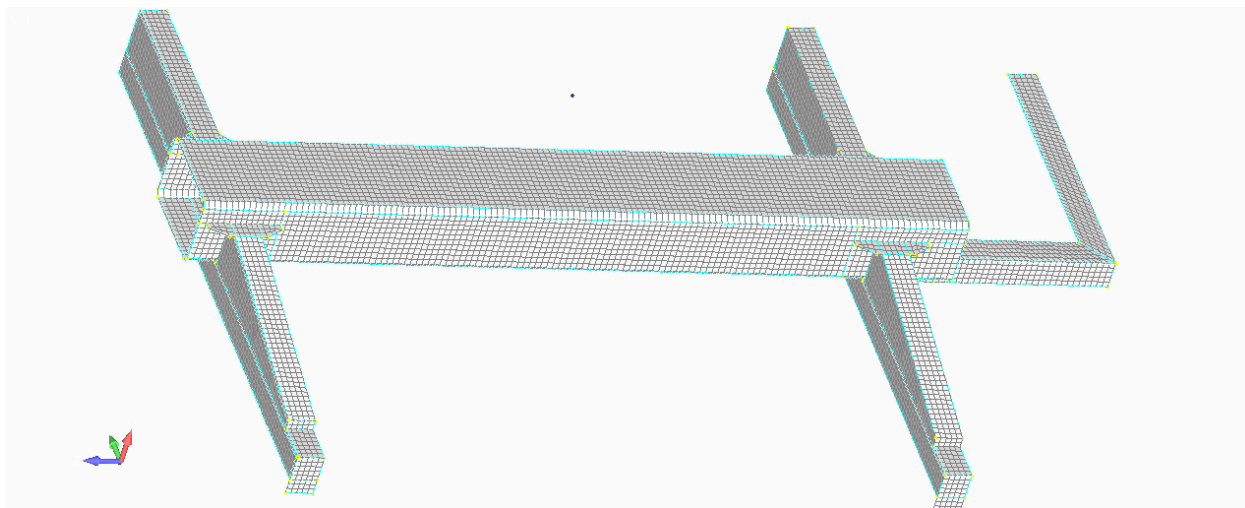
Треба водити рачуна при пројектовању површина које належу једна на другу, у том случају могу постојати две идентичне површине једна испод друге, које при креирању мреже морају имати исти број подела и исту мрежу. Када се означене површине пројектују на уздужни носач, на том месту постоје две површине – једна испод друге (слика 55).



Слика 55: Поклапање површина услед пројектовања

Сада је могуће креирати мрежу на моделу, користећи **Meshing Toolbox**, **Mesh Size on Surface/Curve**, **Mesh Surface**. Најпре се уноси величина елемената опцијом у пољу **Mesh Size** која је у овом 20. Коначни елементи су хексе без међучворова.

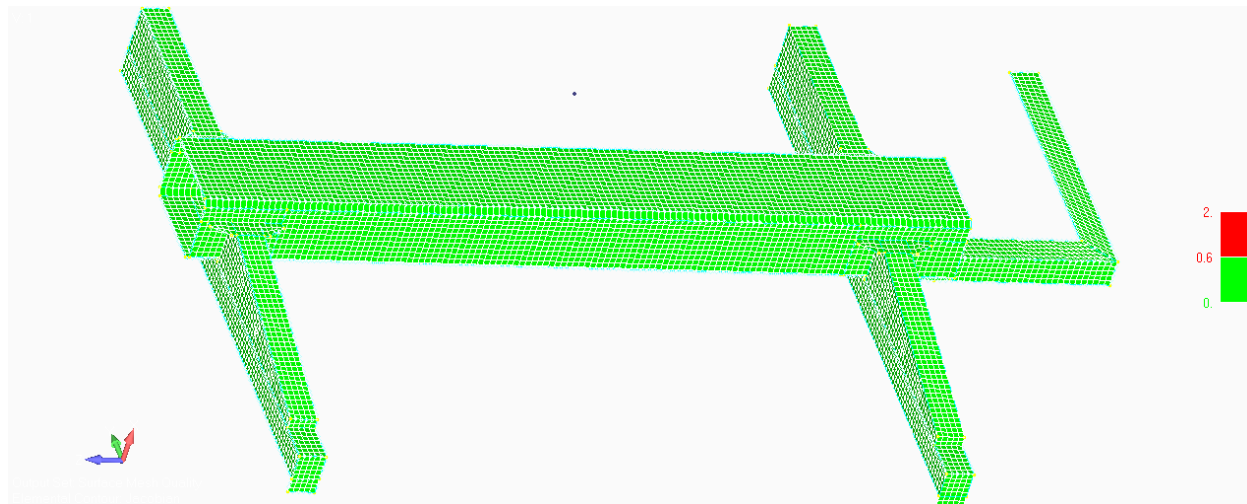
Редом креирати мрежу (слика 56) на површинама, притом водити рачуна о подели на свакој криви .



Слика 56: Модел МКЕ

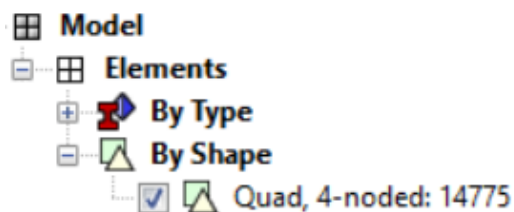
Главне предности коришћења коначног елемента љуске су смањење величине модела, а самим тим и времена за предпроцесирање и постпроцесирање. Уколико се пореде 2D и 3D коначни елементи, за креирање 2D елемената потребно је много мање времена.

Након креирање мреже од 14 775 елемената, погодно је проверити квалитет по **Jacobian**-у. Изабрано је два нивоа квалитета при чему је максималана дозвољена вредност 0.6 (слика 57).



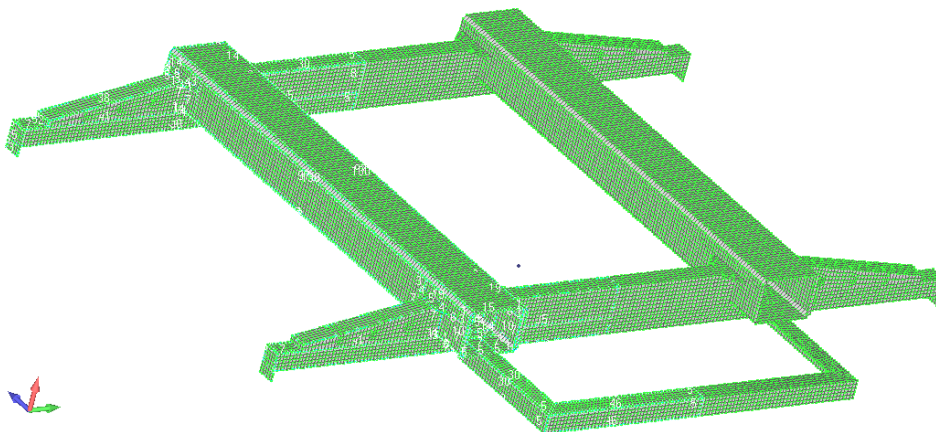
Слика 57: Провера исправности елемената Jacobian-ом

Из приложеног се види да је квалитет мреже добар и да се може наставити са задавањем оптерећења, граничних услова и анализом. Квалитет се може проверити, код овог типа коначног елемента и по броју троуглова на моделу. На моделу не постоји ниједан троугаони елемент (слика 58).



Слика 58: Облик коначног елемента

Због симетричности модела, било је довољно креирати мрежу на једној половини модела и затим је командом **Mesh > Reflect > Global Plane** пресликати на другу половину (слика 59).

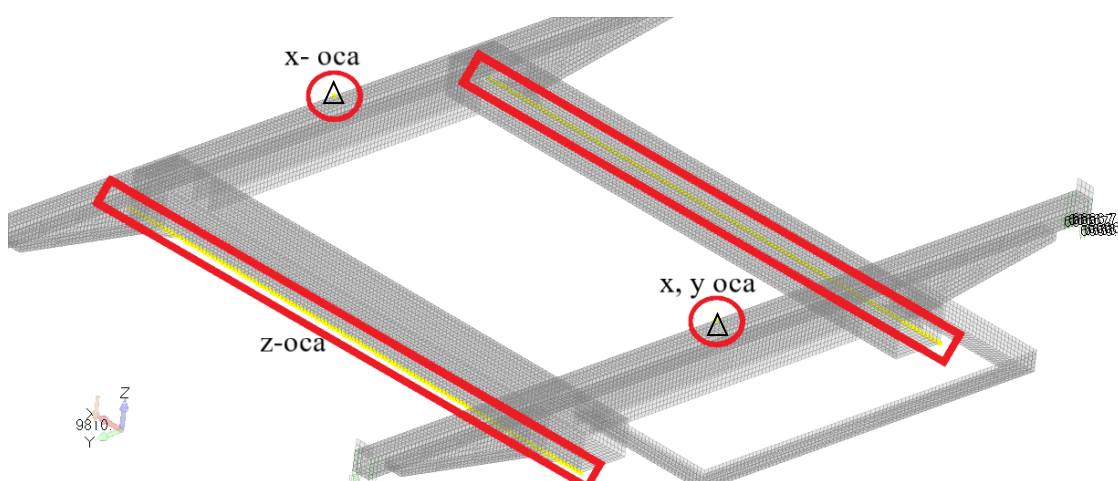


Слика 59: Мрежа на целокупном моделу

Потребно је још креирати **property**-је и задати материјал на моделу. **Property** свакој површини можемо одредити са оригиналног 3D модела мерењем дебљина страница. На основу дебљина, сваком од појединачних модела задавати различит **property**. Карактеристике материјала су узете као код челика S235.

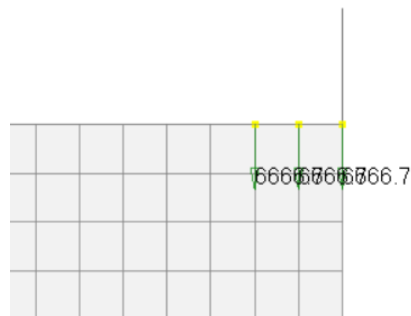
Након ових корака, потребно је задати граничне услове и оптерећења на моделу носача за виљушкар и пустити анализу.

У експлоатацији, терет је окачен ланцима на крајеве наставка за виљушкар па је сходно томе потребно задати граничне услове. Оптерећење је сконцентрисано на крајевима попречних носача што значи да су оптерећени на савијање. Гранични услови се задају на чворовима датим сликом 60 и онемогућено је кретање по z-оси на оба уздужна носача (са спољашње стране). Задаје се услов и у два чвора, једном по x и y осе, а другом само по x.



Слика 60: Гранични услови

Што се оптерећења тиче, задају се на крајња три чвора попречних носача. Оптерећење које се задаје конструкцији је износи 16 t, што је по 4 t на сваком крају. Поред тога се задаје и убрзање Земљине теже (слика 61).



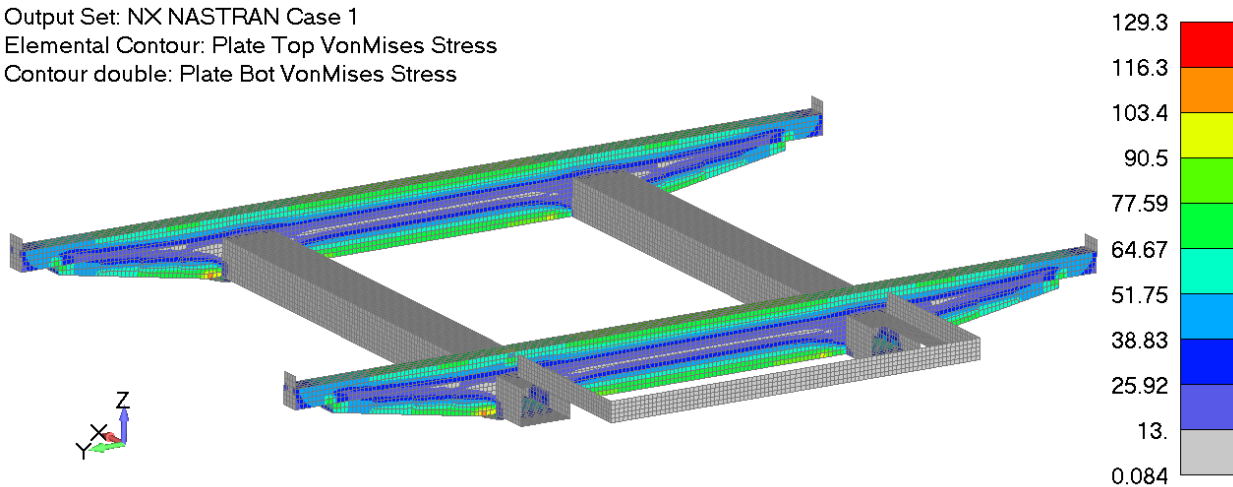
Слика 61: Оптерећење

Добијени резултати напона приказани су следећим сликама:

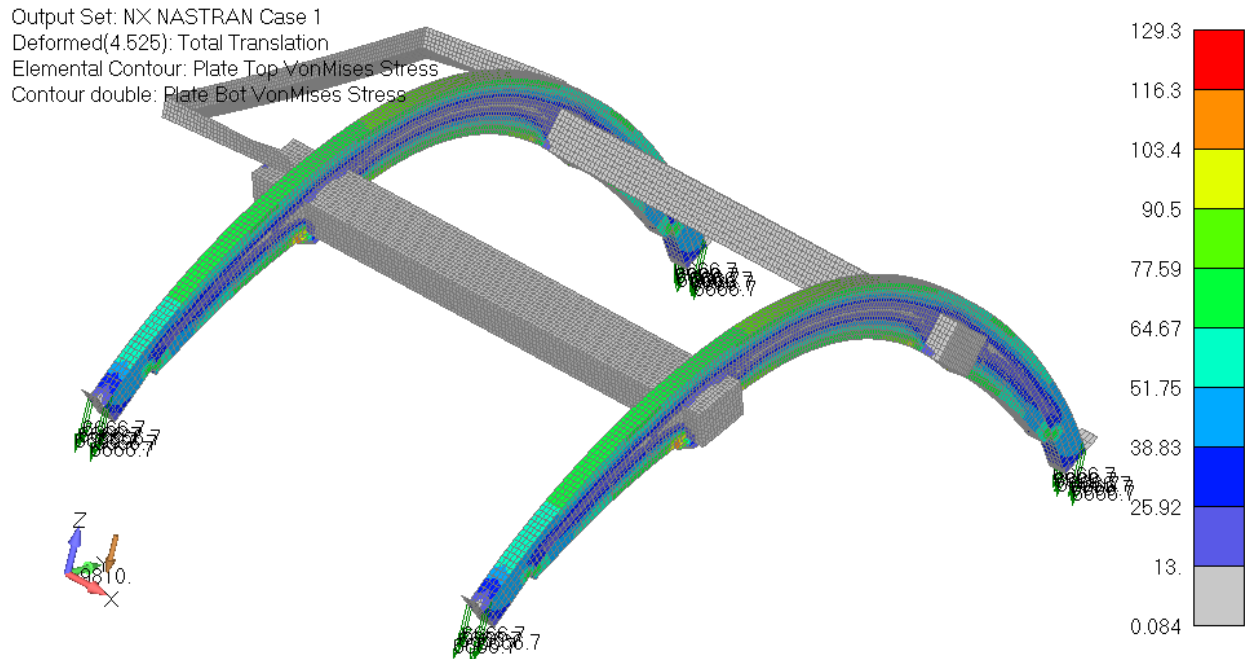
Output Set: NX NASTRAN Case 1

Elemental Contour: Plate Top VonMises Stress

Contour double: Plate Bot VonMises Stress

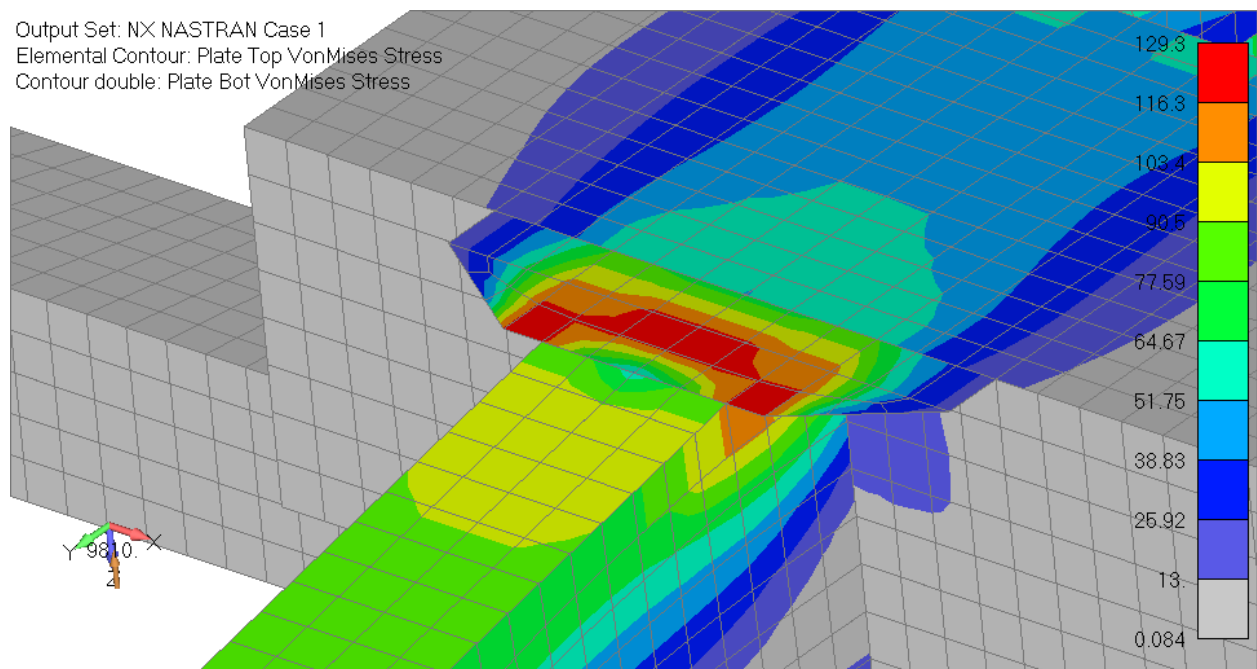


Слика 62: Поље напона



Слика 63: Модел услед деформације

На слици 64 дат је приказ поља напона. Највећа концентрација напона се јавља на ребру које се налази на споју уздужног и попречног носача, најмања на уздужним носачима и граничнику који скоро и да не утиче на напонско поље.

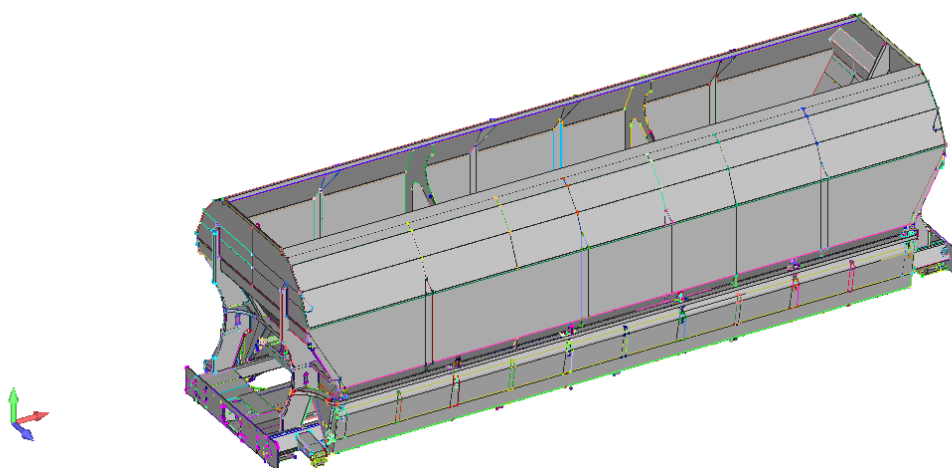


Слика 64: Највећи напон на моделу

5. Примена алата Meshing Toolbox на сложеније конструкције

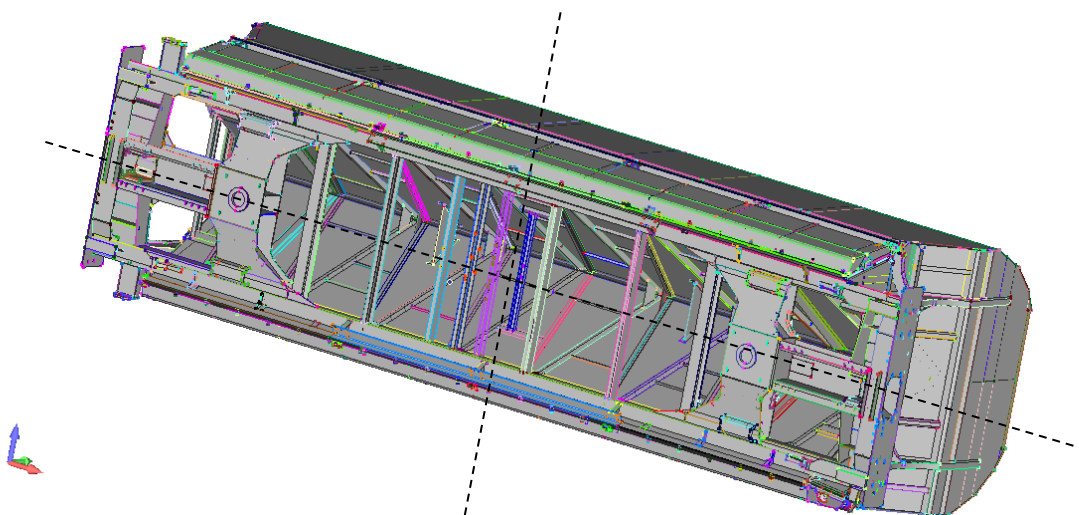
Претходним примерима је вишеструко показана ефикасност алата *Meshing Toolbox*. Добро познавање алата скраћује време израде модела средњих површина и могућност манипулисања било којом геометријом.

Пример комплексније геометрије ће управо бити разматран у наставку. У питању је конструкција вагона са великим бројем ентитета које је потребно модификовати (слика 65).



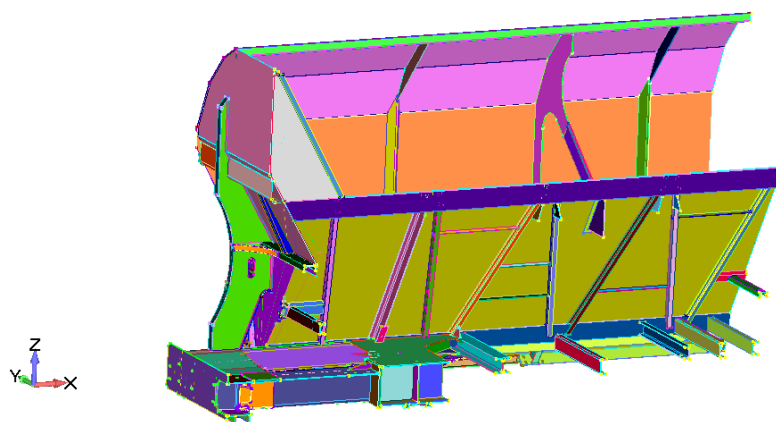
Слика 65: Модел вагона

Сагледавањем модела могуће је уочити симетричност конструкције по две равни симетрије, што значи да ће се средње површине креирати на $\frac{1}{4}$ модела (слика 66).



Слика 66: Симетричност на моделу

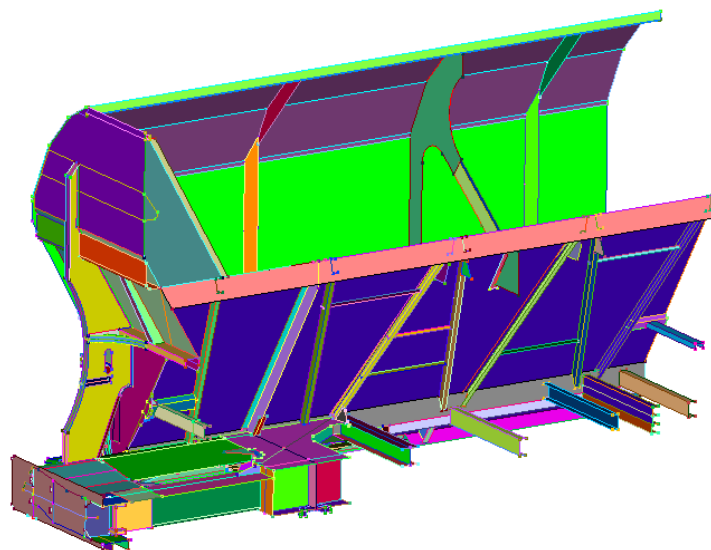
Поступак израде средњих површина је идентичан показном примеру у поглављу 2. Након креирања лауег-а, дељења модела на четири једнака дела добија се четвртина модела показана сликом 67.



Слика 67: Четвртина модела

На четвртини модела је сада потребно креирати средње површине задавањем максималне дебљине између којих ће се формирати површине.

Након креирања средњих површина (слика 68) користи се палета алата **Meshing toolbox** како би се са модела уклонила непотребна геометрија, екструдовале површине и манипулисало потребним ентитетима.



Слика 68: Средње површине на конструкцији вагона

Пример показује да колико год да је комплексна геометрија или има велики број ентитета, добрим познавањем напоменутог алата је могуће релативно брзо доћи до жељених резултата.

6. Закључак

У раду је извршена анализа поступка креирања средњих површина коришћењем алата Meshing Toolbox. CAD модел је увезен у софтвер Femap где су уз помоћ напоменутог алата креиране средње површине модела. Упоређивањем процеса креирања средњих површина без алата Meshing Toolbox и са употребом алата долази се до закључка да је унапређена брзина рада и уштеда у времену. Детаљним описом функција свих алата унутар Meshing Toolbox-а илустративним примерима стиче се увид у предности које кориснику ови алати доносе.

На примеру модела средњих површина наставка за виљушкар, демонстриране су могућности сета поменутог алата који се тиче креирања и дорађивања геометрије средњих површина. Вршена је компаративна анализа функционалности алата унутар палете и њених пандана изван алата и на практичном примеру су поново показани бенефити коришћења овог алата.

МКЕ модел наставка за виљушкар моделиран је коначним елементом љуске. Поступак израде мреже коначних елемената је извршен коришћењем алата унутар Meshing Toolbox-а. Након формирање мреже на читавом моделу, испитиван је квалитет мреже и правилност геометрије коначних елемената.

Задати су гранични услови и оптерећења на моделу, а затим је прорачун пуштен кроз солвер NX Nastran. Анализа резултата и постпроцесирање извршени су у софтверу Femap.

Како би се приказале могућности обраде модела сложене геометрије анализираним поступцима у овом раду, у софтвер Femap унет је CAD модел танкозидне конструкције вагона.

Из свега наведеног у овом раду закључује се да увођењем сета алата Meshing toolbox процес израде модела средњих површина и креирање МКЕ мреже постаје знатно бржи у поређењу са алатима који се налазе ван ове палете.

Сви алати ове палете налазе своју примену у процесима креирања средњих површина и формирања МКЕ мреже модела, без обзира да је модел који се обрађује једноставне или комплексне геометрије.

Литература

- [1] Милош Којић, Радован Славковић, Мирослав Живковић, Ненад Грујовић, Метод коначних елемената 1- Линеарна анализа, Крагујевац, 1998,
- [2] Интернет страница: <https://structures.aero/software/femap/>, приступљено 1.9.2019
- [3] Femap with NX Nastran, Help
- [4] Интернет страница:
<https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/simcenter/femap.html> ,
приступљено приступљено 2.9.2019