

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Примењена механика и аутоматско управљање

Предмет: Коначни елементи

Број индекса: 187/2014

Стефан Д. Огњановић

МКЕ анализа заварених спојева

завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. др Мирослав Живковић-ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат би требало да:

- Објаснити појам заваривања
- Објаснити значај заваривања као један од најчешће начина спајања склопова и подсклопова конструкција
- Значај методе коначних елемената при анализи заварених конструкција.
- Извршити анализу резултата добијених нумеричким прорачунима у солверу *NX Nastran* за различите методе моделирања заварених спојева.
- Извести закључна разматрања.

Препоручена литература:

[1] **Милош Којић, Радован Славковић, Мирослав Живковић, Ненад Грујовић**, Метод коначних елемената 1- Линеарна анализа, Крагујевац, 1998.

[2] **Development of a Finite Element Based Nominal Stress Extraction Procedure for Fatigue Analysis of Welded Structures**, Alewyn Petrus Grové, Department of Mechanical and Aeronautical Engineering, University of Pretoria, September 2006

[3] Интернет ресурси

Крагујевац, датум

ментор:

Проф. др Мирослав Живковић

Резиме

Рад представља компаративну анализу нумеричких резултата до којих се дошло различитим начинима моделирања заварених спојева. Циљ рада је био да се утврди која је од разматраних метода најкориснија са аспекта брзине моделирања а да се добију меродавни резултати. За верификацију резултата узет је Т спој једноставне геометрије да би се што лакше искоментарисали добијени резултати. На основу изведених закључака изведене су смернице и правци будућих истраживања. Рад представља једну добру основу за будућа истраживања при решавању комплекснијих примера у области МКЕ анализе заварених спојева.

Кључне речи: напон, деформација, МКЕ, заварени спој, Т-профил

Abstract

The paper presents a comparative analysis of the numerical results that resulted from different ways of modeling welded joints. The aim of the paper was to determine which of the methods considered is the most useful from the aspect of modeling speed, and to obtain the relevant results. For the verification of results, T specimen is a compound of simple geometry in order to make it easier to comment on the obtained results. On the basis of the deductions made, the guidelines and directions for future research have been developed. The paper presents a good basis for future research in the solution of complex examples in the FEM analysis of welded joints.

Key words: stress, deformations, MKE, welded joints, T-specimen

Садржај:

1. Увод	6
2. Заваривање, заварени спојеви и приступи процене заварених спојева	7
2.1. Методе процене века трајања завареног споја	8
2.2. Приступ номиналног напона	9
2.3. „Hot spot“ приступ	10
2.4. Приступ ефективног концентратора напона	11
3. Имплементација методе коначних елемената за испитивање заварених спојева	13
4. Технике моделирања заварених спојева	16
4.1. Моделирање заварених спојева 3Д елементима	16
4.1.1. Моделирање заварених спојева укошеним елементима љуске	17
4.1.2. Моделирање заварених спојева крутим везама	17
4.1.3. Моделирање заварених спојева повећањем дебљине	18
4.2. Моделирање и МКЕ анализа заварених спојева вагонских конструкција	20
4.2.1. Моделирање заварених спојева вагонских конструкција	20
4.3. Поставка модела	21
4.3.1. Т-модел	21
4.3.2. Анализа методом коначних елемената	22
5. Резултати прорачуна	25
5.1. Солид – 3Д изопараметарски коначни елемент	25
5.2. Љуска	28
5.2.1. Коначни елемент љуска са моделираним завареним спојем елементом љуска ...	29

5.2.2. Коначни елемент љуска без моделираног завареног споја.....	32
5.2.3. Коначни елемент љуска са моделираним завареним спојем чврстом везом	35
5.3. Упоредивање резултата четири модела.....	38
Закључак.....	40
Литература:	41

1. Увод

Према основним концепцијама спајања елемената конструкције, посебно заваривањем, може се уочити да је експлоатациона сигурност заварене конструкције према лому од оптерећења, један од најважнијих захтева при њеном пројектовању, конструисању и изради. И поред правилно предвиђених и примењених конструктивно-сигурносних мера у пракси ипак долази до ломова, што многе истраживаче усмерава на даља истраживања и проучавање критеријума сигурности заварених спојева. Циљ истраживања јесте да се испита услов и узрок настанка лома, као и мера потребних за добијање производа траженог квалитета. Како нема технички и економски идеалног решења, то се при изради неке заварене конструкције или елемента тежи оптимизацији и рационализацији завареног производа. При пројектовању конструкције тежи се оптималном избору елемената конструкције, материјала и технологије. Комплетно пројектовање производних система са свим његовим саставним елементима данас се може извести успешно само уз подршку компјутерских технологија. Најуспешније светске фирме као и развијене државе, указују на ту чињеницу. Предности компјутерских софтверских пакета за пројектовање и моделирање обезбеђује брз и економичан одговор предузећа на тржошту. Можда још значајнија предност је та што увођењем софтверских пакета попут Femap-а и њему сличних, број грешака у току производње, експлоатације и радног века конструкција или елемената, знатно се смањило.

Овај рад за циљ има демонстрацију битности одабира техника моделирања заварених спојева као и њено испитивање у софтверском пакету Femap са NX Nastran солвером. У свакодневници, инжењери се труде да побољшају софтвере у циљу добијања бољих решења тј. решења готово идентичним реалним испитивањима. Циљ тога јесте уштеда материјала, времена и новца. У раду су детаљно објашњене технике моделирања заварених спојева, МКЕ анализаа све у циљу уштеде времена и новца при моделирању истих.

У раду су посматрана четири модела, моделирана различитим техникама применом методе коначних елемената. Заварени спојеви су моделирани коришћењем 3Д коначног елемента, коначног елемента љуске, чврсте везе и модел без конкретног моделирања вара.

2. Заваривање, заварени спојеви и приступи процене заварених спојева

Заваривање има широку и веома разнородну примену у машинству и другим индустријским гранама. Омогућује израду машинских делова и целих конструкција спајањем делова различитих облика. Делови који улазе у састав заварених конструкција претежно су израђени од масивних железарских полупроизвода, као што су лимови, профили итд. Заваривање је процес израде нераздвојивог споја успостављањем међуатомских веза између делова који се заварују, при коме се појединачно или комбиновано користи топлотна или механичка енергија, а по потреби и додатни материјал. Заваривањем се успешно спајају метал и метал, неметал и неметал, као и неметал и метал. Овај поступак има широку примену у грађевинарству, бродоградњи, аутоиндустрији, процесној техници, војној индустрији и другим гранама индустрије.

Заваривање као процес има велику примену али узевши то у обзир има својих предности и мана. Предности заваривања су упрошћавање конструкције, замена технологије ливења и ковања у економском погледу, затим смањење масе конструкције погодним избором и рационалним избором материјала. Такође одабиром одговарајућих врста завареног споја као и начина заваривања смањујемо оптерећења заварених спојева.

Заварени спој (слика 1.) је део нераздвојивог споја изведен заваривањем од елемената завариваног материјала. Заварени спој се састоји из шав и основног материјала од којег су израђени елементи који се спајају заваривањем. Шав или вар представља део завареног споја који се образује очвршћивањем растопа мешавине истопљеног основног и додатног материјала на месту споја. Постоје случајеви као код заваривања танких лимова где се шав образује само стапањем и очвршћивањем ивица основног материјала.

Све заварене конструкције и елементи изложени су у завиности од намене различитим оптерећењима која могу бити статичка или динамичка. Величину тих оптерећења узимамо у обзир при димензионисању заварене конструкције применом знања из Отпорности материјала и Теорије еластичности. Спољна оптерећења се називају радним, а њиховим дејством у облику сила или момената настају и одговарајући радни напони. Осим ових напона у полупроизводима и готовим производима готово увек се јавља сопствени напон. Тај напон се другачије назива унутрашњи или заостали напон и они нису резултат дејства спољних оптерећења већ су последица израде дела тј. у нашем случају последица заваривања. У случајевима када су напони истог знака као и радни, њихов збир може прећи границу еластичности. Последица тога је пластична деформација коју ћемо даље испитивати. У општем случају у области завареног споја, напон се нелинеарно простира кроз дебљину плоче приказане на слици 1. Према IIW-у [3](интернационалном институту

за заваривање) одговор напона кроз дебљину конструкцијског члана на токовима заваза кроз плочу може се поделити на три основне компоненте као што је приказано на слици 1 [3]. Прва компонента је мембрански напон који је константан кроз целу дебљину плоче и рачуна се као средња вредност напона. Друга компонента је напон кривљења љуске, који се мења линеарно кроз дебљину плоче. Трећа компонента напона је нелинеарна и представља заостали напон у шаву завареног споја настале због геометрије завареног споја.



Слика 1. Дистрибуција напона у области завареног споја

Овај елемент је испитиван на затезање при дејству аксијалних сила. Као што видимо на слици 1. напон шави тј. завареног споја има нелинеарну карактеристику. Прва компонента напона, мембрански напон има линеарну вредност по целој својој области, напон кривљења љуске такође је линеарна али мења знак по средини завареног споја. Заостали напон у шаву који је како је наведено, последица геометрије завареног споја, представља нелинеарну компоненту и ту можемо приметити настанак напонских максимума.

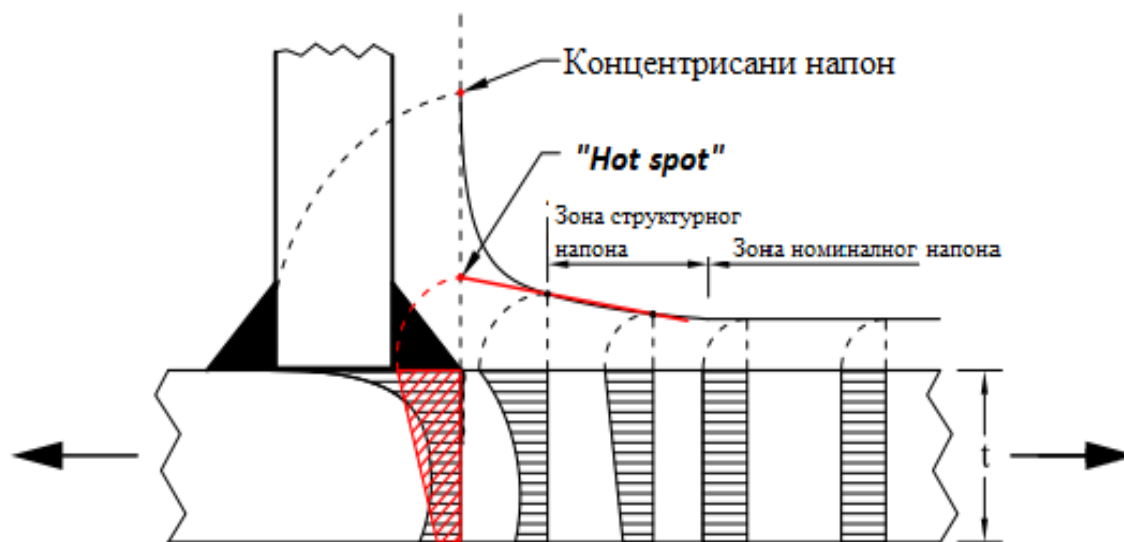
2.1. Методе процене века трајања завареног споја

Постоји велики број метода који се користе за процену животног века завареног споја под оптерећењем. Углавном, методе које се користе за процену трајања животног века челичне конструкције се заснивају на напону, замору или факторима интензитета напона. Постоје четири устаљене методе које се користе за процене металних конструкција попут мостова, бродова итд. Најједноставнији и најчешће коришћени метод јесте метод номиналног напона („nominal stress method”) и он се своди у глобалне методе. Методе које су категоризоване као локалне су:

1. „hot spot” метода,
2. метода највећег ефективног концентратора напона (the effective notch stress method)

3. метода ширења прслине.

Заједнички карактеристични фактор за прве три методе јесте тај да ове методе, узевши у обзир линеарну еластичну теорију или нумеричку методу као што су FEM или BEM, се заснивају на класификацији S-N криве која се односи на процену укупног радно века, док се четврти метод заснива на основним принципима механике лома који обухвата раст прслине, независан од били које S-N криве. S-N крива или крива замора представља график између напона и броја циклуса постављених за испитивање заварених спојева. У овом раду метода ширења прслине неће бити коришћена [2]. Параметри напона коришћени у процени завареног споја приказани су на слици 2.1.

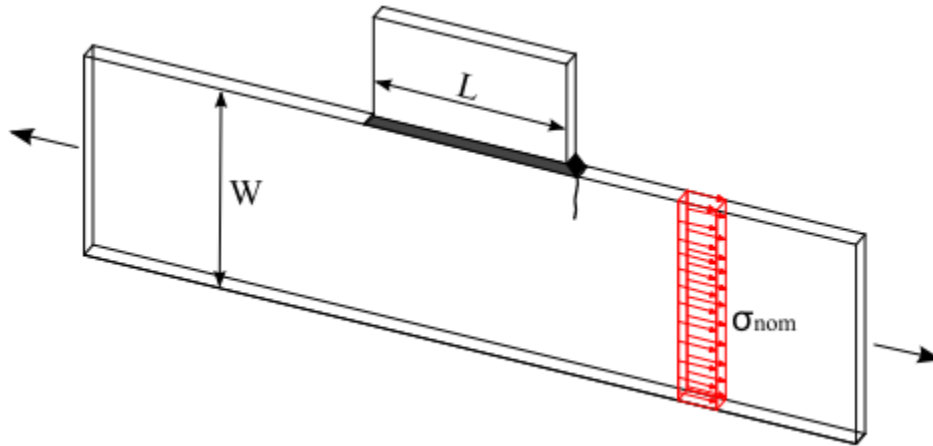


Слика 2.1 Расподела напона кроз дебљину плоче и површине близу завара

2.2. Приступ номиналног напона

Приступ номиналног напона је најједноставнији и најчешће коришћен метод за процену радног века испитивање металних конструкција. Овај метод се углавном заснива на средњој вредности напона у зони испитивања узевши у обзир свеукупно линеарно понашање у зони еластичности. Локални ефекти подизања вредности напона заварених спојева и причвршћених плоча су занемарени у израчунавању напона. У прорачуну заварених спојева, иако нису урачунати локални ефекти подизања вредности напона заварених спојева, ефекти геометријске конфигурације или неправилности главне компоненте морају да буду укључени у даљи прорачун. Ове геометријске конфигурације и неправилности се могу дефинисати као дисконтинуитет у попречном пресеку, у другим речима геомтријске модификације које често могу да имају значајан ефекат на расподелу напона кроз целу конструкцију. У случајевима комплексне геометрије ова метода није употребљива [2].

Приликом примене приступа номиналног напона напрезању на ивице плоче, номинални напон у попречном пресеку се може једноставно израчунати коришћењем линеарне теорије линеарне еластичности штапова, приказано на слици 2.2. Ова теорја каже да је напон еквивалентан количнику силе и попречног пресека.



Слика 2.2. Номинални напон

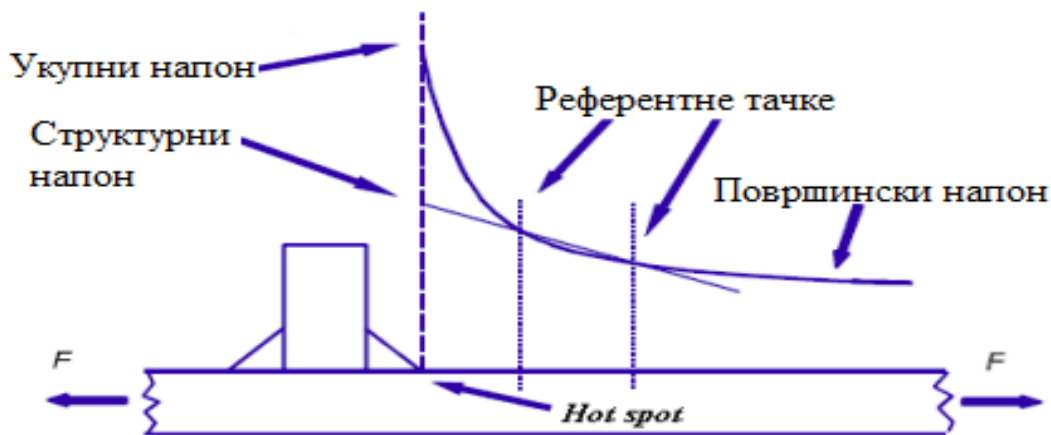
2.3. „Hot spot” приступ

Структурни напон у компоненти је дефинисан као напон који је удаљен од завара за неку вредност или на самом завару у зависности од структурне конфигурације или макро геометрије. Линеарно се преноси преко плоче или дебљине љуске. Суседни структурни дисконтинуитет повећава структурни напон на два начина прерасподела мембранског стреса услед додане крутости прикључка и секундарних напона савијања љуске услед ексцентричности прикључка. „Hot-spot” напон је вредност структурног напрезања у компоненти или структури, на месту где се очекује иницирање пукотине (углавном завар). Израчунава се као збир мембранског напона и локалног савијајућег напона, искључујући нелинеарни напонски максимум због завара. Стварни локални напон на месту завара, у комбинацији са заосталим напонима услед заваривања и карактеристикама материјала, регулише животни век завара, посебно период иницијације прслине. Међутим, његово дређивање је веома тешко због стохаистичке природе геометрије завареног зрна, а то је само један фактор утицаја. Ово је довело до идеје о дефинисању „ Hot-spot “напона као структуралног напрезања на токовима заваривања, искључујући локални максимум напона.

Слика 4. илуструје разлику између стварног концентратора напона и структурног „ Hot-spot “напона. Процена чврстоће завареног споја и живота трајања проистекла је из упоређивања структурних амплитудних „ Hot-spot “ напона у компоненти или структури са структурним „хот спот“ напоном добијених S-N кривом на сличан начин као и S-N криве номиналног напона. Са обзором на то да је „ Hot-spot “ напон дефинисан на дужини варова

као што је приказано на слици 2.3., прво је предложено мерење амплитуде напона како би се сензори мерења приближили ближе врху вара, на локацијама где се очекују пукотине. Предлог је било мерење на дистанци од 3мм од завара [3]. Овај предлог је даље усавршен мерењем напона на два места, на малој удаљености од завара, а затим одређивањем напона на завару помоћу поступка екстраполације који се такође види на слици 4.

Као што је већ поменуто, концентрација локалног напона услед зареза завареног споја искључена је из анализе, али имплицитно укључена у криву S-N. Импликација тога је слична номиналном приступу у смислу да се утицај стварне локалне геометрије завареног споја на замор не може проценити „Hot-spot“ методом. Распршеност (scatter) предвиђања у трајању замора конструкције која садржи концентрор напона (завара) такође је много мања од широко коришћеног приступа номиналног напона, јер је стање напона много прецизније дефинисано. Једна лимитација ове методе је та да је једино примењива за евалуацију отказа завареног споја. Међутим, ово није озбиљан проблем пошто структуре, са могућношћу пуцања основе се гледају као лоше опције за дизајнирање. Такође постоји и основни принцип дизајнирања у коме се могућност пуцања основе елиминише. Један од позитивних аспеката ове методе је компитабилност са методом коначних елемената, и самим тим представља јак алат за прорачун напона, поготову у сложеним структурама.

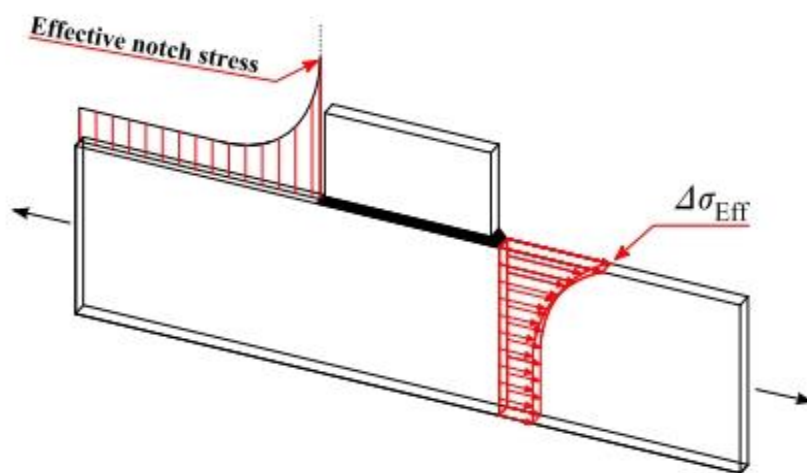


Слика 2.3. Мерење и дефиниција „Hot-spot“ напона на завару

2.4. Приступ ефективног концентратора напона

Концентратори напона који проистичу из геометријских дисконтинуитета, као што су рупе, зглобови и дефекти заваривања у структурним компонентама су прилично чести

и не могу се избећи. Чврстоћа заварених зглобова је у великој мери зависна од својства зареза, дајући веће концентрације напона што доводи до смањеног радног века завара [4]. Концентрисани напон у завареним спојевима је укупни локални напон проузрокован како компонентама геометрије тако и локалним подизачима напона тј. самим заваром. Овај приступ налажења ефективног напона у зазору се у основи заснива на прорачуну највећег еластичног напона у критичним тачкама, тј. местима настајања прелина. За анализу заварених спојева коришћењем методе ефективног концентратора напона, у зони испитивања концентратора напона геометријски детаљи морају да имају довољну концентрацију елемената да би се обухватио максимални напон у месту концентрације напона. Главни услов за употребу ове методе је детаљна геометрија у зони где се очекује настанак прелине треба моделирати и оформити мрежу МКЕ са довољном прецизношћу што се генерално може постићи употребом 3Д солид елемената. Међутим, модели засновани на 2Д раванским елементима могу бити коришћени за случајеве просте геометрије и расподеле оптерећења. Ова метода, као и претходне две, укључена је у IIW [3], као препоручена алтернатива за процену радног века завареног споја. Ефективни напони у завару испитиваног споја су прорачунати коришћењем технике субмоделирања пошто је требало оформити фину мрежу у области око критичних тачака како би се добио максимални еластични напон, приказано на слици 2.4.



Слика 2.4. Концентратор ефективног напон

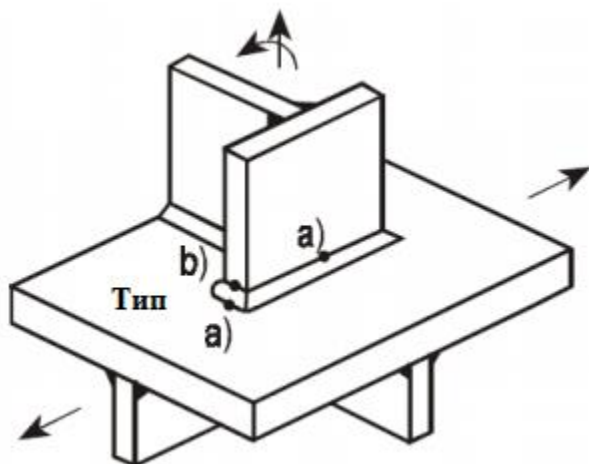
3. Имплементација методе коначних елемената за испитивање заварених спојева

Настанак нумеричких метода као што је метода коначних елемената нам омогућава детаљну анализу модела комплексних структура и користи се за одређивање напона и анализу заварених спојева. Имплементација методе коначних елемената захтева добро разумевање принципа и законитости које стоје иза МКЕ. Затим, морамо узети у обзир граничне услове, особине мреже, зависност величине и могућност елемента да обухвати испитивани напон. Такође, мора се водити рачуна о тачном и прецизном моделирању зоне завареног споја.

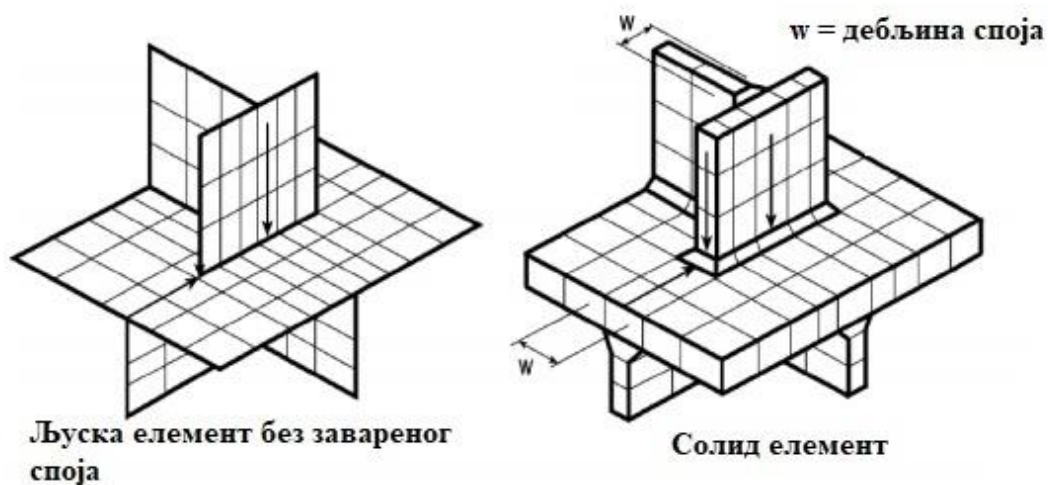
Метода коначних елемената нам омогућава коришћење различитих елемената, у циљу моделирања и пројектовања одређеног проблема. За проблем заварених спојева, користе се углавном коначни елементи греде и љуске као и 3Д коначни елементи. У овом раду за креирање геометрије модела коришћен је коначни елемент љуске као и 3Д коначни елемент. Коначни елемент љуске се користе за моделирање раванских структура попут плоча, при чему се моделира само средња површина плоче. Један од недостатака је тај што није могуће у потпуности моделирати реалну чврстоћу и расподелу напона у зони заваривања као и око ње. 3Д елементи се користе за моделирање тродимензионалног напона и поља деформације. Генерисање превише грубе мреже 3Д елементима може такође преувеличати чврстоћу савијања у случају плоча.

„Hot-spot“ метода, као што је већ речено, искључује нелинеарни напонски максимум који настаје због зареза у завареном споју. Ово мора бити усклађено са поступком коначних елемената. За испуњавање овог захтева, напон мора бити извучен на тачкама интеграције елемената који се налазе уз ток вара тј. унутар елемента на интеграционим тачкама елемента или у тачкама чворова на некој удаљености од „ Hot-spot “ места завара. Мрежа мора бити пречишћена на такав начин да градијент напона у близини „ Hot-spot “ тачке може бити прецизно екстрапоиран и корелиран са напонима који се користе за одређивање S-N криве „ Hot-spot “-а. Мрежа би такође требала бити пречишћена на такав начин да даље пречишћавање неће утицати на расподелу напона унутар подручја између тачака екстраполације. Niemi (1995:35) је утврдио да је нелинеарни врх напона још увек укључен на растојању од 0,4 т локалног зареза (т = дебљина плоче) када су плоче моделиране са више слојева чврстих елемената кроз дебљину. Сходно томе, резултати напона треба прочитати изван подручја који садрже нелинеарни напонски максимум (0.4 т) и екстраполирани на тачку заваривања или линеаризован кроз дебљину плоче када је у подручју од 0.4 т, као што ће касније бити илустровано кроз Донгову рад (2001). Уместо тога, може се користити један слој елемената с смањеном интеграцијом, као што је претходно речено. Комисија IIW (Niemi, 2002) у суштини дефинише два типа „ Hot-spot “-ова за структуре плоча као што је приказано на слици 6. тип „а“ Hot-spot -а које се налазе

на површини плоче и типу „б“ који се налазе на ивици плоче. Осмочворни љуска елементи или двадесеточворни солид елементи са смањеном интеграцијом су препоручљиви за коришћење. Слика 3.2. показује љуска и солид елементе који су моделирани на основу слике 3.1.

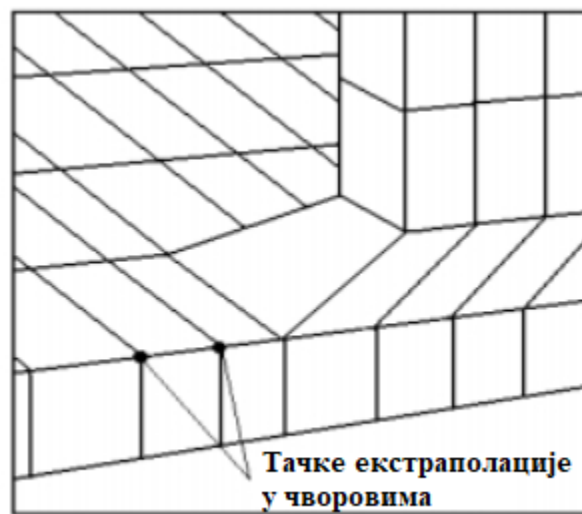


Слика 3.1. Приказ типова *hot spot* „a“ и „b“



Слика 3.2 Приказ љуска и солид коначних елемената

Слика 3.3. представља пример мреже са солид елементима са тачкама екстраполације на чворовима. Тачке екстраполације су лоциране на 0.4т и 1.0т респективно и користимо 8-чворне елементе са смањеном интеграцијом.



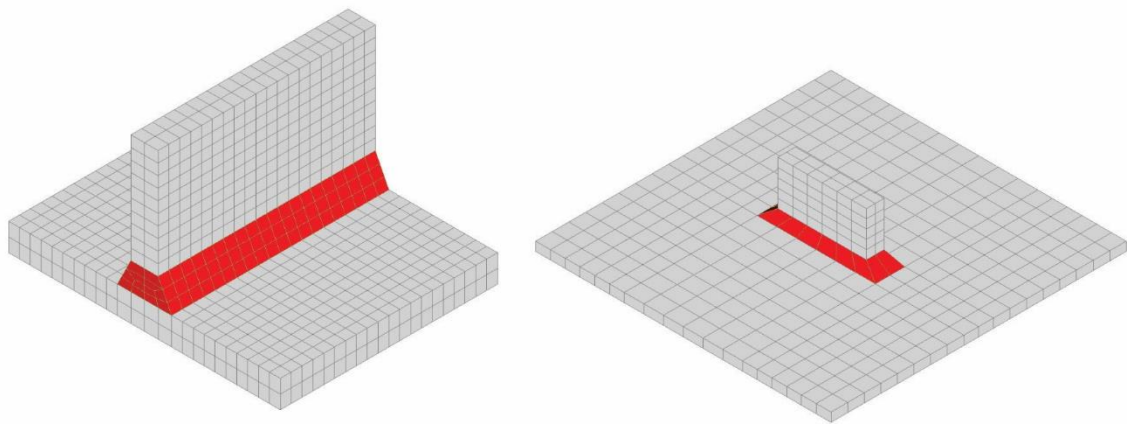
Слика 3.3. Тачке екстраполације на чворовима

4. Технике моделирања заварених спојева

Запремински или просторни модели варова, који узимају у обзир геометрију самих варова, најлакше се моделирају 3Д елементима, док моделирање варова коначним елементима љуске захтева мало више труда при моделирању. У моделима који су креирани коначним елементима љуске вредност напона у зони заварених спојева може бити директно зависна од начина моделирања завареног споја. Са циљем да се повећа тачност процене вредности напона и времена моделирања заварених спојева развијане су многобројне технике моделирања [5], [6].

4.1. Моделирање заварених спојева 3Д елементима

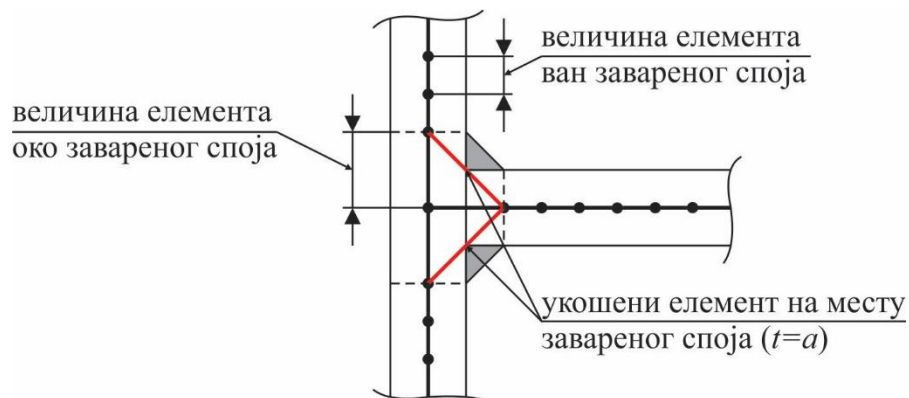
Најједноставији начин креирања мреже коначних елемената запреминских модела са варовима је моделирање 3Д коначним елементима (слика 4.1). Због униформности увек је лакше да цео модел буде сачињен од 3Д коначних елемената, него да се ради у комбинацији са коначним елементима љуске, чак и у случају да се ради о танкозидним завареним конструкцијама. Разлог томе је што 3Д коначни елементи имају три степена слободе у сваком чвору, док коначни елементи љуске имају пет или шест степени слободе у сваком чвору. У том случају потребно је увести неку технику повезивања коначних елемената љуске и 3Д коначних елемената како би се момент савијања са љуски пренео на 3Д коначне елементе модела. Један од метода доступан у МКЕ софтверима је повезивање елемената МПЦ (енг. „Multi Point Constraint”) једначинама. Овом методом задају се једначине којима се ротација са љуски преноси на 3Д елементе. Задавање ових једначина изискује додатно време неопходно за креирање мреже коначних елемената у којима су плоче, моделиране коначним елементима љуске, повезане међусобно 3Д коначним елементима, који представљају заварене спојеве.



Слика 4.1 Моделирање заварених спојева 3Д елементима - Мрежа коначних елемената

4.1.1. Моделирање заварених спојева укошеним елементима љуске

Мрежа коначних елемената модела танкозидних конструкција најчешће се креира елементима љуске, при чему се варови у зонама заварених спојева моделирају укошеним елементима љуске [7]. Ова техника моделирања пружа могућност да се у потпуности представе и геометрија и чврстоћа заварених спојева. Пример моделирања „Т“ споја укошеним елементима љуске приказан је на слици 4.2. Дужина и дебљина укошених елемената љуске којима се моделирају варови зависе од геометрије вара и висине корена вара, респективно.



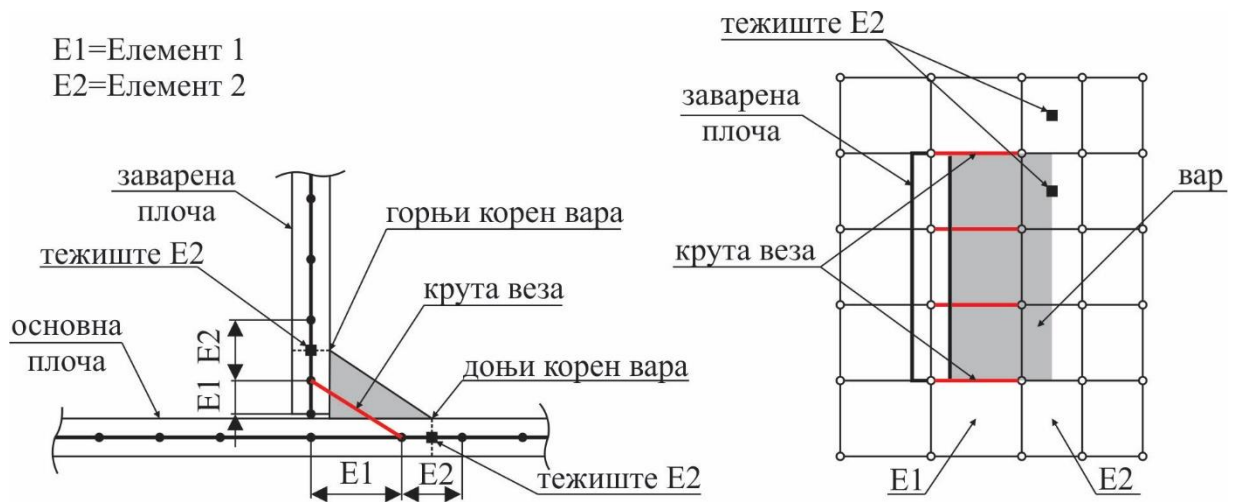
Слика 4.2 Моделирање заварених спојева укошеним елементима љуске [7]

Ова техника моделирања захтева јако прецизно креирање мреже, које у потпуности прати геометрију. Вредности напона добијене на овај начин могу се са великом поузданошћу користити за прорачуне преслика у корену завареног споја. Због тога се ова техника највише примењује за процену отказа услед замора у врховима заварених спојева.

4.1.2. Моделирање заварених спојева крутим везама

Моделирање заварених спојева крутим везама први пут се среће у литератури [1]. Циљ развоја ове технике је да се што боље одреди концентрација напона у врху завареног споја. У складу са овом техником напон у врху завареног споја може се директно прочитати у тежишту елемента (слика 4.3). Основа ове технике је да се моделира локална крутост у завареном споју, као последица самог вара. Ова локална крутост као последица вара може да се моделира повезивањем суседних елемената љуске крутим везама које су дефинисане паровима чворова дуж целог завареног споја. Величине елемената Е1 и Е2 (слика 4.3) треба дефинисати тако да заједно са крутим везама представљају реалну локалну крутост услед вара и да се на тај начин добију релевантне вредности напона, неопходне за даљу анализу. Крутим везама се повезују заједнички чворови елемената Е1 и Е2. Веома је битно истаћи да чворови елемената на месту споја плоча нису спојени („мерцовани“, енг.

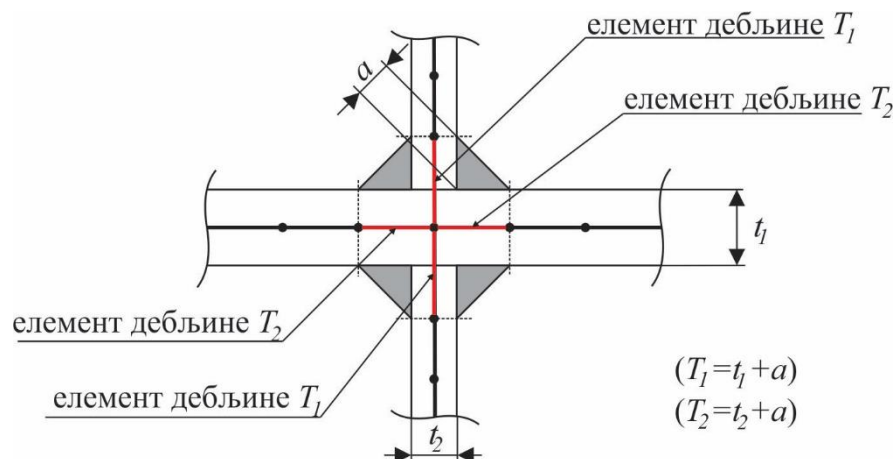
merdge). Препоручује се да се при овој техници моделирања заварених спојева користе четворочворни елементи љуске.



Слика 4.3. Заварени спој изведен са једне стране моделиран крутом везом [6]

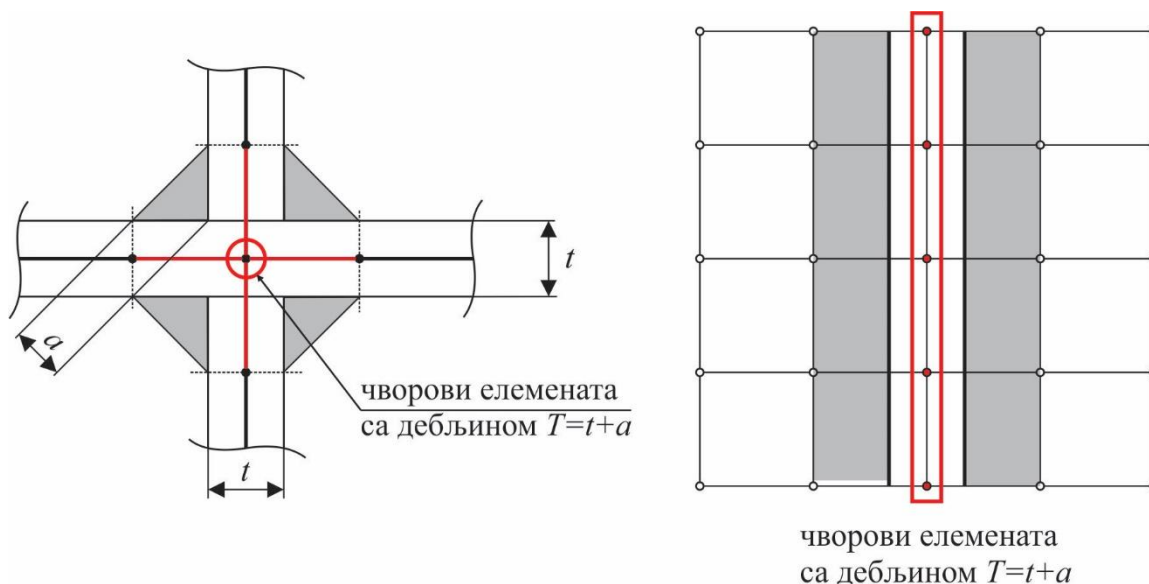
4.1.3. Моделирање заварених спојева повећањем дебљине

У циљу да се на што бољи начин дефинише утицај крутости вара на прорачун заварених спојева развијен је приступ моделирања заварених спојева повећањем дебљине елемената љуске на месту где се налази заварени спој [7]. Ова техника се заснива на две веома битне геометријске модификације: повећање дебљине и величине елемената љуске у околини завареног споја. На слици 4.4 приказан је начин моделирања завареног споја у облику крста где су подебљани елементи обе плоче које се заварују, с' обзиром на испуњеност вара са обе стране. И код овог начина моделирања препоручује се коришћење четворочворних елемената љуске.



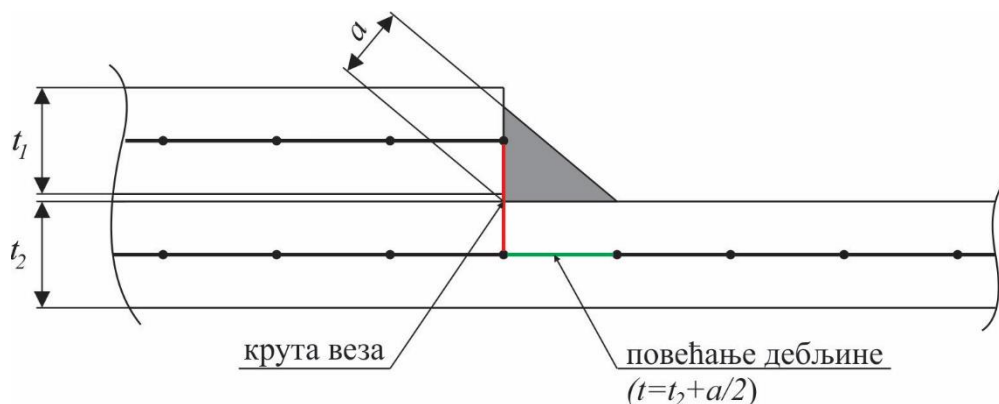
Слика 4.4. Моделирање заварених спојева елементима љуске са повећаном дебљином [5]

Унапређивањем ове технике моделирања могуће је елементе који се налазе на месту завареног споја две плоче истих дебљина креирати тако да на месту два чвора елемента која се налазе на почетку вара љуска има дебљину као и основна плоча док би дебљина на месту преостала два чвора на супротном крају представљала збир дебљине основне плоче и висине вара (слика 4.5)



Слика 4.5. Моделирање заварених спојева елементима љуске са постепеним повећањем дебљине

Код моделирања преклопних заварених спојева предлаже се коришћење комбинације технике са крутим везама и технике са повећањем дебљине. Плоча која се заварује повезује се са основном плочом крутим везама, док се елементу основне плоче на месту вара повећава дебљина (слика 4.6)



Слика 4.6. Моделирање преклопног завареног споја комбинацијом техника са крутим везама и са повећањем дебљине [5]

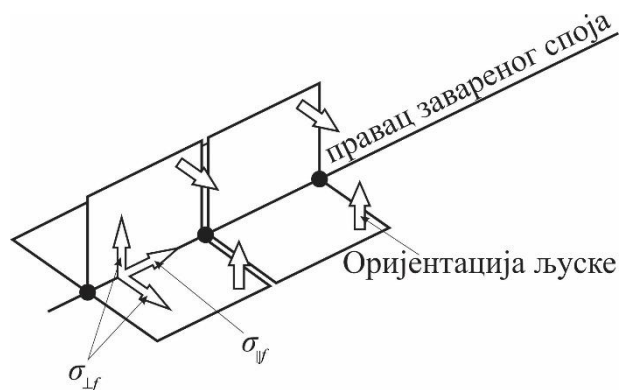
4.2. Моделирање и МКЕ анализа заварених спојева вагонских конструкција

Заварени спојеви представљају најчешће конструкцијско решење за спајање компонената и склопова при изради вагонских конструкција. Зато је јако битно на правилан и адекватан начин направити мрежу коначних елемената модела вагона, потребног за МКЕ анализу, на основу које је даље могуће проценити интегритет саме конструкције и свих заварених спојева у њој.

4.2.1. Моделирање заварених спојева сложених конструкција

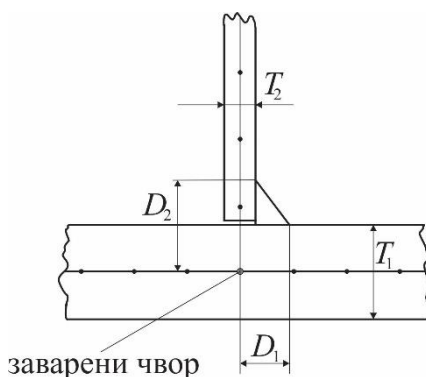
Уколико би се неке комплексне конструкције, састављене од великог броја заварених спојева, моделирале неком од наведених техника то би захтевало пуно времена за креирање мреже коначних елемената. Изложене технике моделирања су обично применљиве за неке мање сложене конструкције, за чију је израду потребно мање времена и које у свом саставу немају претерано велики број заварених спојева.

Уобичајена вагонска конструкција у просеку у свом саставу има неколико стотина заварених спојева. Уколико би се сваки заварени спој моделирао неком од изложених техника, за прављење мреже утрошио би се велики напор и добио би се огроман модел за анализу. Зато се при моделирању заварених спојева користе елементи љуске без икаквих детаља. На слици 4.7, приказан је правилан начин моделирања завареног споја елементима љуске.



Слика 4.7. Правилна оријентација љуске у зони завара

За процену вредности напона у завареним спојевима неопходно је дефинисати величину зоне завареног споја у МКЕ анализи (слика 4.8). Једначине (4.1) и (4.2) представљају обрасце за дефинисање зоне завареног споја у МКЕ анализи (слика 4.8) [8].



Слика 4.8. Величина зоне завареног споја при МКЕ прорачуну

$$D_1 = f_{ele} (0.5 T_{sused} + T_{min}) = 1 \cdot (0.5 T_2 + T_2) \quad (4.1)$$

$$D_2 = f_{ele} (0.5 T_{sused} + T_{min}) = 1 \cdot (0.5 T_1 + T_2) \quad (4.2)$$

4.3. Поставка модела

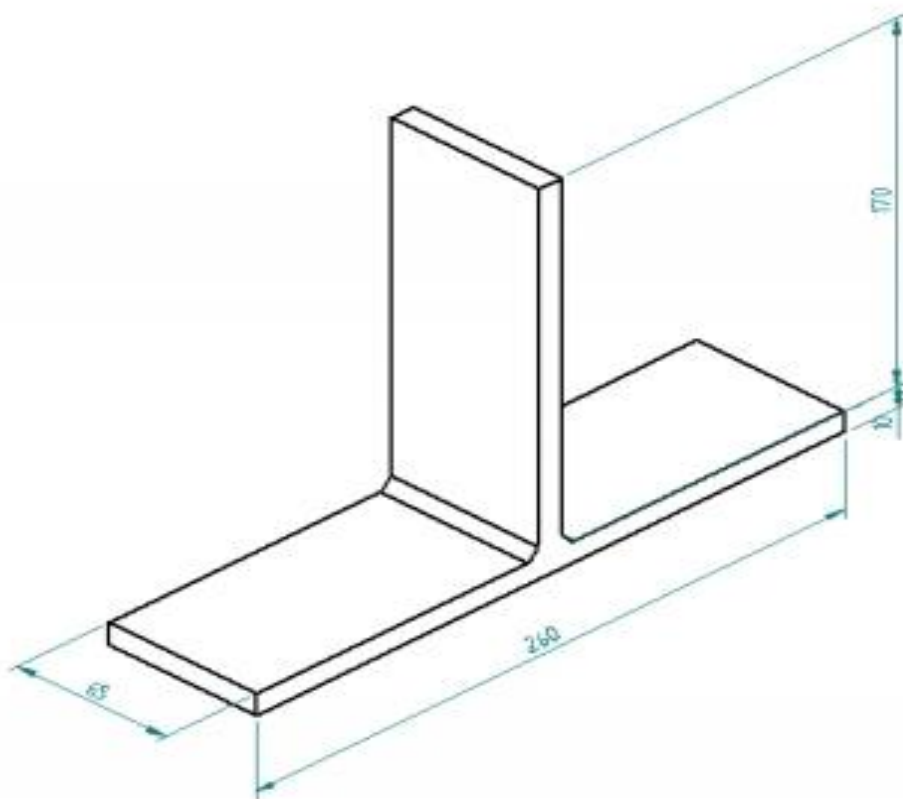
4.3.1. Т-модел

Узорак на коме је одрађено испитивање статичког оптерећења је Т-модел/комад приказан на слици 4.9. Испитивани узорак је направљен првенствено заваривањем две веће 10мм плоче а затим обрадом узорака величине како би се елиминисали крајњи ефекти заваривања као што је подрезивање. Материјал је 300W челик за заваривање са следећим, карактеристикам добијених од произвођача:

Затезна чврстоћа: 300МПа.

Еластични моду: 206GPa.

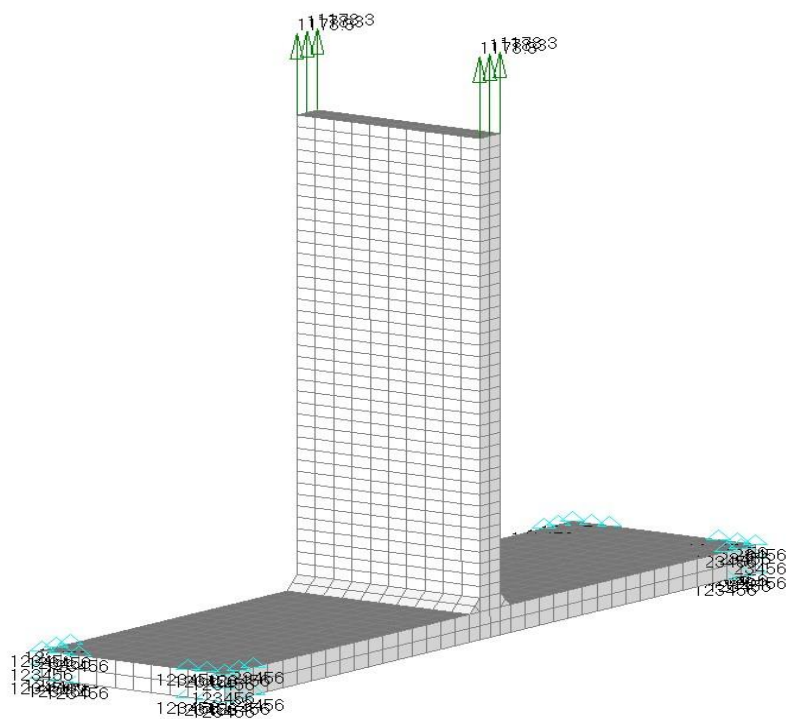
Поасонов коефицијент: 0.33.



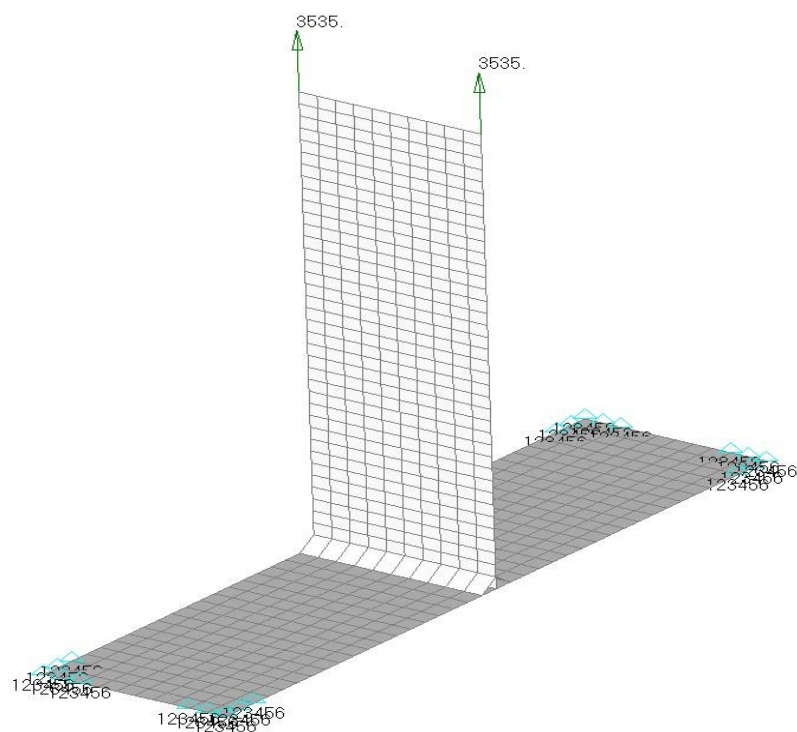
Слика 4.9. Геометрија и димензије

4.3.2. Анализа методом коначних елемената

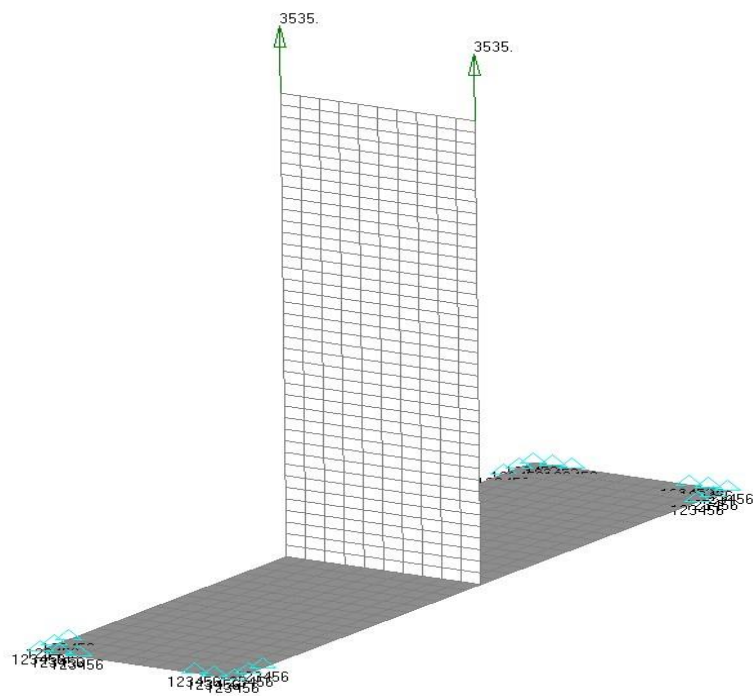
За нумеричко истраживање су направљена четири модела коначних елемената Т-модела са завареним спојем моделираним на четири начина. Гранични услови су у складу са ограничењима из матичног рада [4], крајеви су били фиксирани у свих шест степени слободе а вертикална плоча оптерећени на затезање. Сlike 4.10. до 4.13. илуструју различите моделе мреже коначних елемената. Величина елемената у моделима је еквивалентна вредности $0.5t$ где t представља дебљину плоче. Анализа осетљивости верификовала је да је конвергенција постигнута на овој величини елемената за одређену геометрију у свим моделима. Типични контурни приказ резултата за 8-чворни солид елемент за оптерећење од 3.535kN дат је на слици 4.13. Сила затезања је такође приказана на сва четири примера. Према матичном раду поређење је рађено између реалног експеримента и ова четири модела, међутим у овом раду приказана је компарација добијених резултата ових модела као и одступања у њима. Слика 4.14. показује разлике у напонима који се јављају на $0.5t$ у ова четири модела.



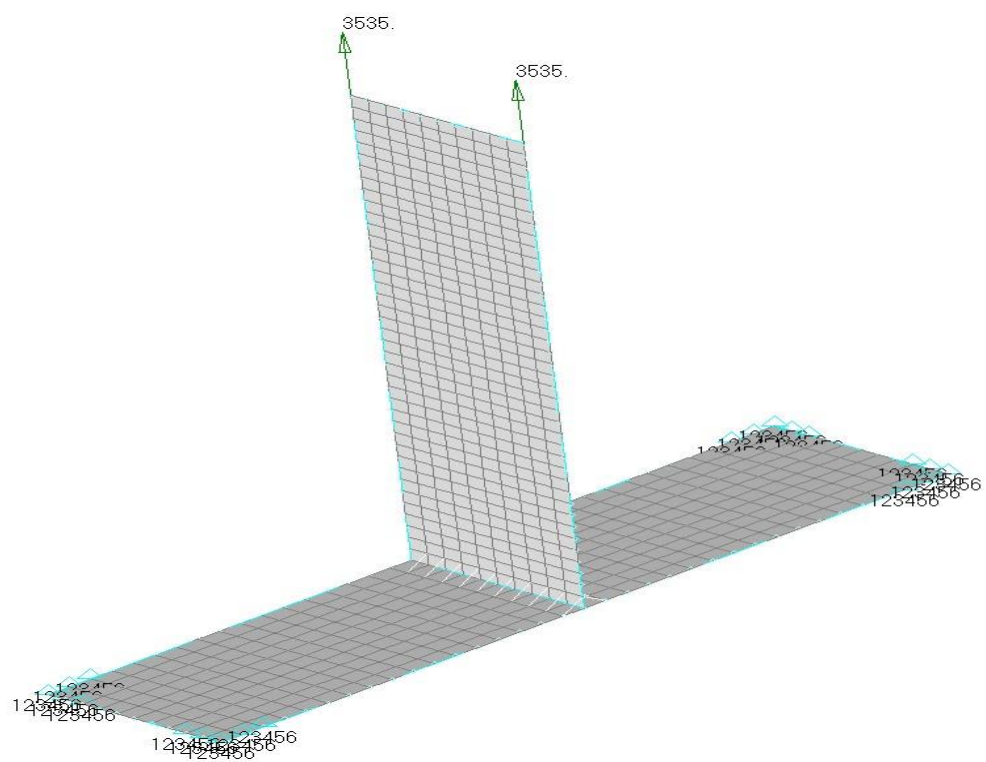
Слика 4.10. *Модел солида 8-чворног коначног елемента*



Слика 4.11. Модел 4-чворног љуска елемента са експлицитни моделом завареног споја као љуска елемента



Слика 4.12. *Модел 4-чворног љуска елемента без модела завареног споја*



Слика 4.13. *Модел 4-чворног љуска елемента са експлицитним моделом завареног споја као крута веза*

5. Резултати прорачуна

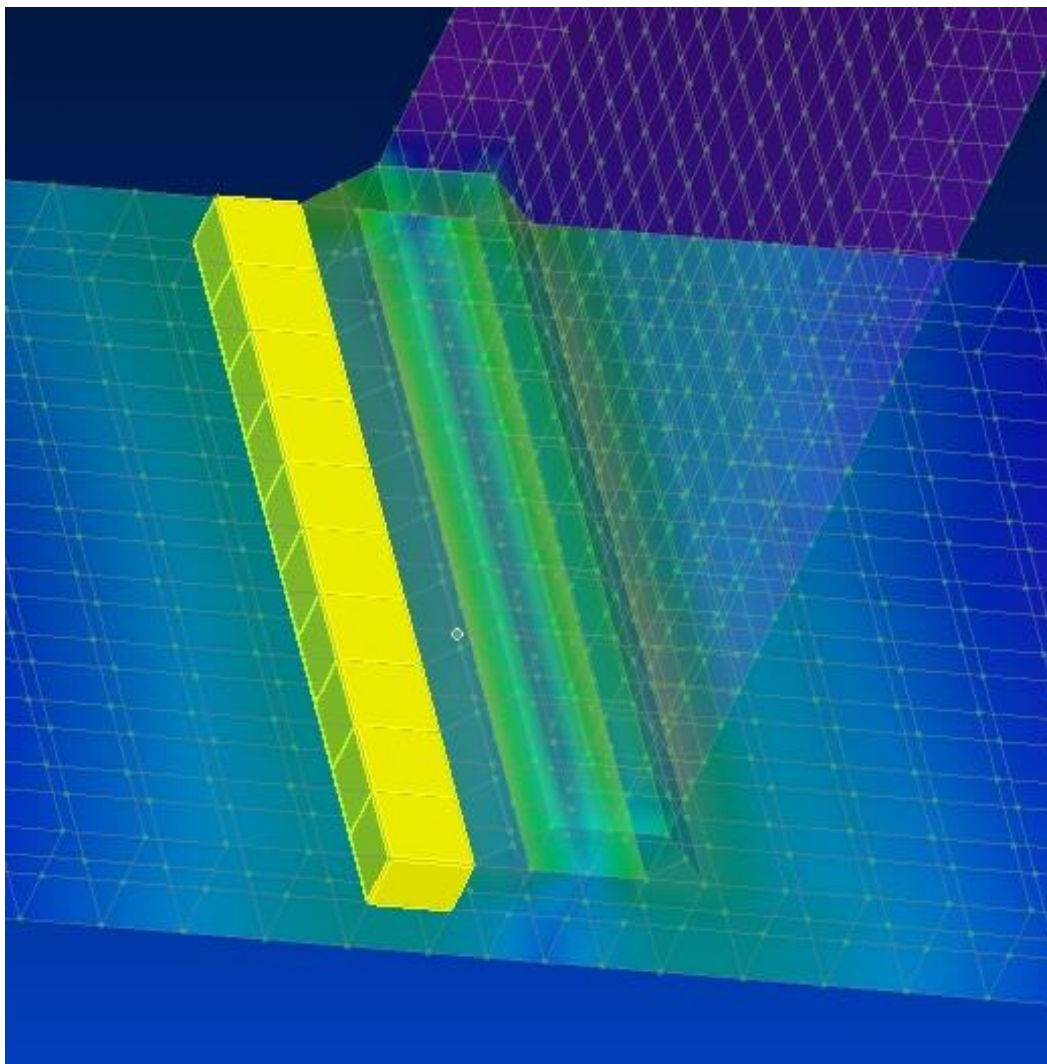
5.1. Солид – 3Д изопараметарски коначни елемент

Овај коначни елемент се користи за моделирање тродимензионалних тела општег облика (3Д континуума). Елемент може имати различити број чворова а уобичајен је број од 8 до 21. Овакав елемент је основни јер има шест површи које га ограничавају. Међутим, од овог елемента се могу формирати и други коначни, не само 3Д изопараметарски, елементи као што су просторна призма, тетраедар или четворострана пирамида [1].

3Д осмочворни коначни елемент, оптерећен је силом затезања од 1.178kN у шест тачака површинског слоја и фиксиран у четири угла основне плоче у по 13 тачака. На основу извршене анализе разматрано је поље VonMises-овог напона као и номинални напон у правцу X-осе, и поља померања у правцу x и y осе, целог модела и издвојене групе у близини завареног споја.

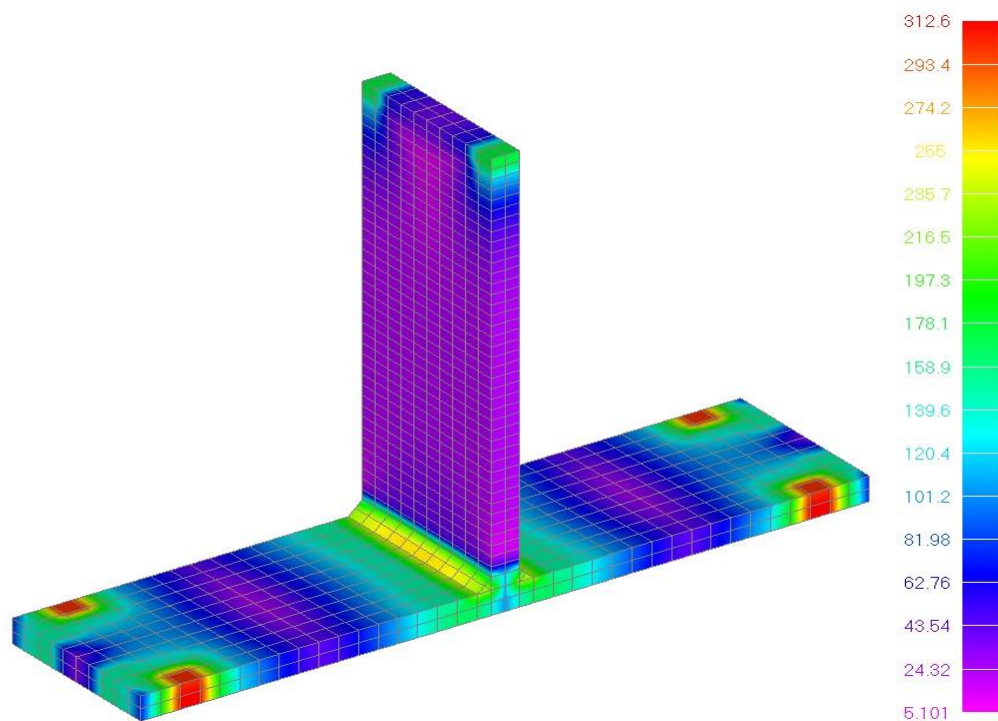
Табела 5.1. Резултати испитивања напона за солид – Von Mises и Номинални напон										
60031. Solid Von Mises Stress				60010. Solid X Normal Stress				60011. Solid Y Normal Stress		
X	Y	ID		X	Y	ID		X	Y	ID
-29.25	143.3147	1256		-29.25	18.32645	1256		-29.25	162.7634	1256
-22.75	147.1972	1255		-22.75	39.22134	1255		-22.75	176.2148	1255
-16.25	144.1986	1254		-16.25	52.72972	1254		-16.25	178.7597	1254
-9.75	143.5807	1253		-9.75	59.45853	1253		-9.75	180.8359	1253
-3.25	143.5335	1252		-3.25	62.21378	1252		-3.25	181.8579	1252
3.25	143.5335	1251		3.25	62.21378	1251		3.25	181.8579	1251
9.75	143.5807	1250		9.75	59.45853	1250		9.75	180.8359	1250
16.25	144.1986	1249		16.25	52.72972	1249		16.25	178.7597	1249
22.75	147.1972	1248		22.75	39.22134	1248		22.75	176.2148	1248
29.25	143.3147	1247		29.25	18.32645	1247		29.25	162.7634	1247

У табели 5.1. приказани су резултати прорачуна добијених у програмском пакету FEMAP with NX Nastran [9]. Резултати приказани у табели 5.1, у колони Y, представљају вредности добијених напона, где колона ID представља редни број елемента који је разматран. Група елемената одабрана за анализу добијених резултата приказана је на слици 5.1.

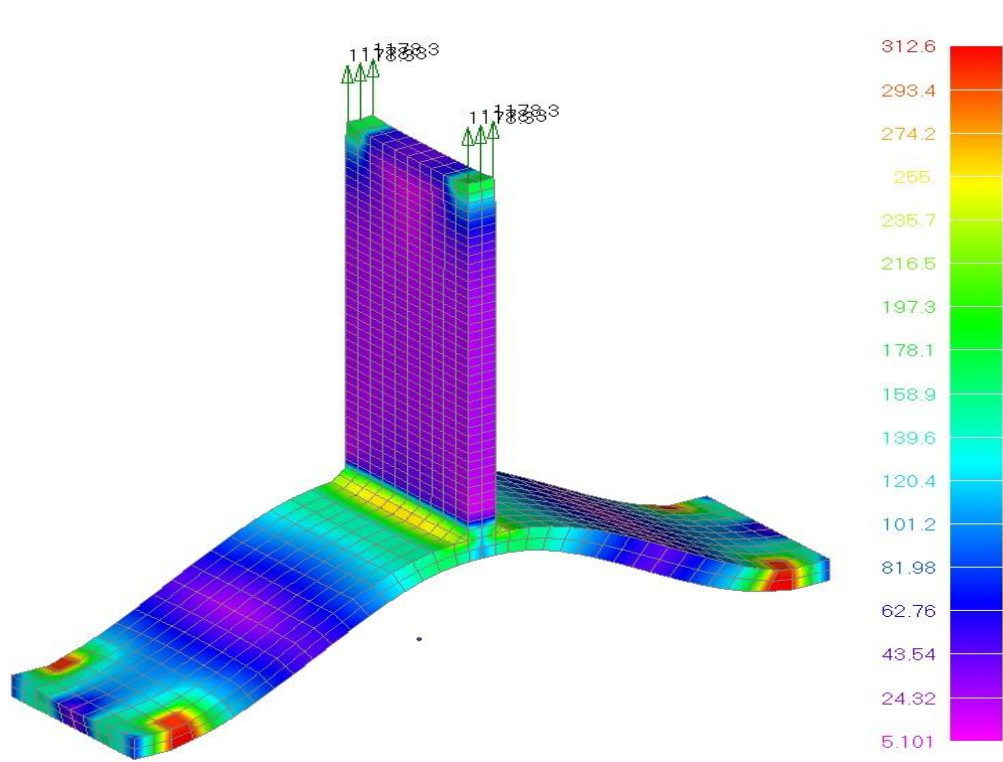


Слика 5.1. Разматрана група елемената

Поље VonMisses-овог напона разматраног модела, приказано на слици 5.2. Максимална вредност добијеног напона је 315MPa и налази се на местима ограничених чворова. Вредности VonMisses-овог напона у оквиру разматране групе креће се у опсегу од 160MPa до 185MPa. Слика 5.3. представља деформисану конфигурацију разматраног модела на основу задатаих оптерећења и ограничења.



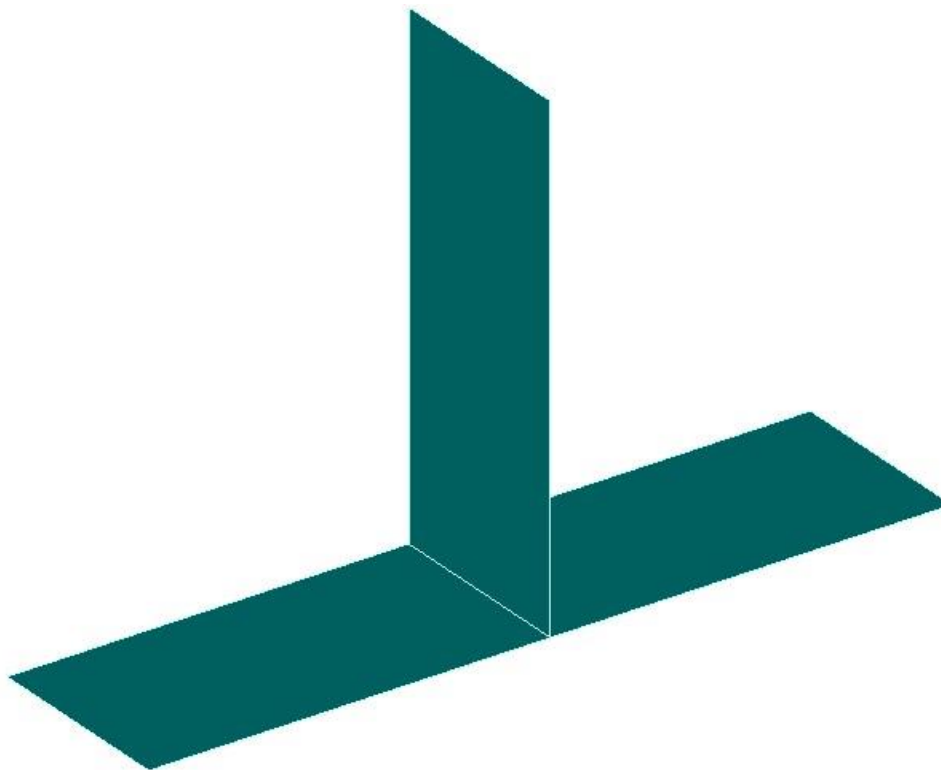
Слика 5.2. Поље *VonMises*-овог напона разматраног модела



Слика 5.3. Деформисана конфигурација анализираниог модела

5.2. Љуска

Овај тип коначног елемента најчешће се користи при моделирању танкозидних конструкција и веома је заступљен у техничкој праски. Неки од примера таквих конструкција су авионске конструкције, куполе, носеће конструкције аутомобила, итд. Дебљина љуске може бити веома мала у односу на остале димензије и у том случају кажемо да се ради о танкој љусци. Можемо увести градације од љуски средње дебљине до дебелих љуски. Љуске, саме по себи, у прошлости а и данас, представљају велики изазов за конструкторе и пројектане. Одувек се тежило да се остваре танке конструкције са минимални утрошком материјала и довољном сигурношћу остварити постављену функцију. У теоријском смислу љуске представљају сложен задатак при израчунавању напонског стања и поља деформације. У даљем тексту биће приказани резултати модела љуски као и различите технике моделирања завареног споја. За креирање МКЕ модела коначним елементом љуске неопходно је направити геометријски модел средњих површина, слика 5.4.



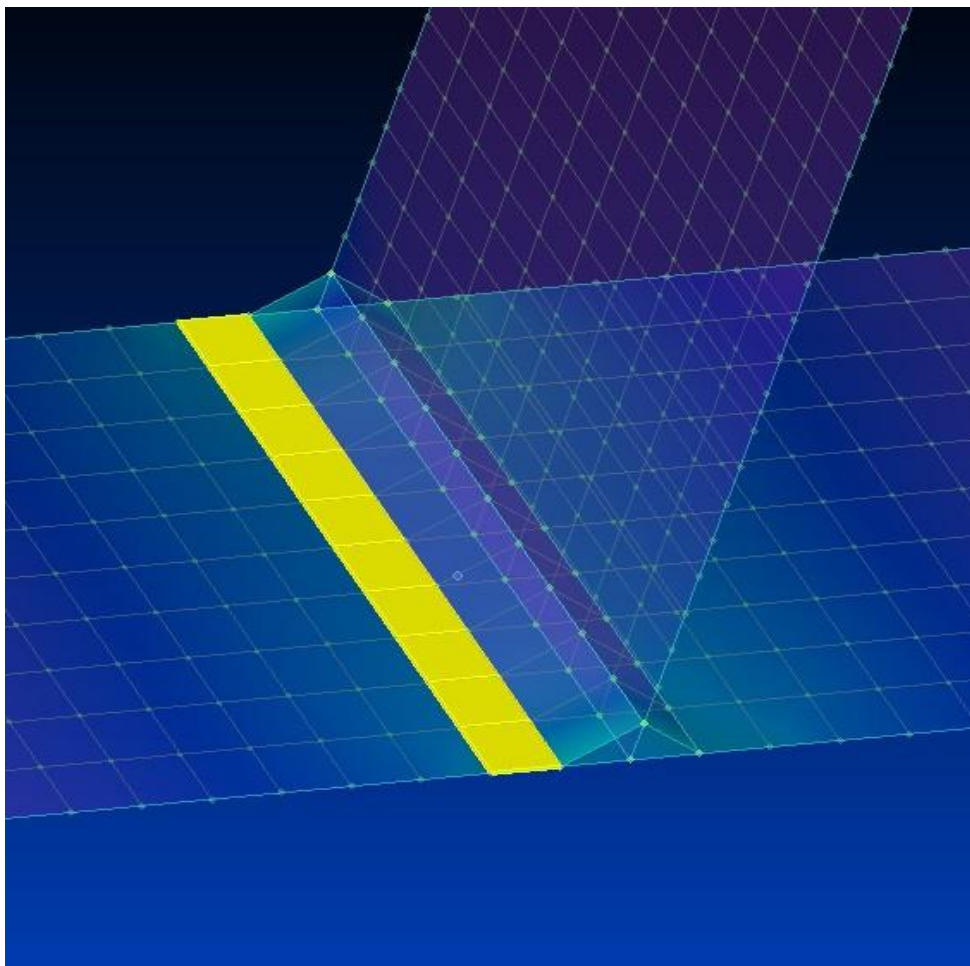
Слика 5.4. Геометријски модел средњих површина у софтверском пакету FEMAP

5.2.1. Моделирање заварених спојева укошеним елементима љуске

У овом случају, заварени спој моделиран је као укошен елемент љуске. Циљ моделирања завареног споја елементом љуска, као и осталим техникама, јесте добијање што бољих и прецизнијих резултата. Овај модел смо оптеретили силом на затезање вредности од 3.535kN у два чвора и, фискирали у четири угла основне плоче у по шест тачака. То нам је омогућило добијање исте суме сила као и у случају солида и делмично поклапање вредности номиналног и Von Mises-овог напона.

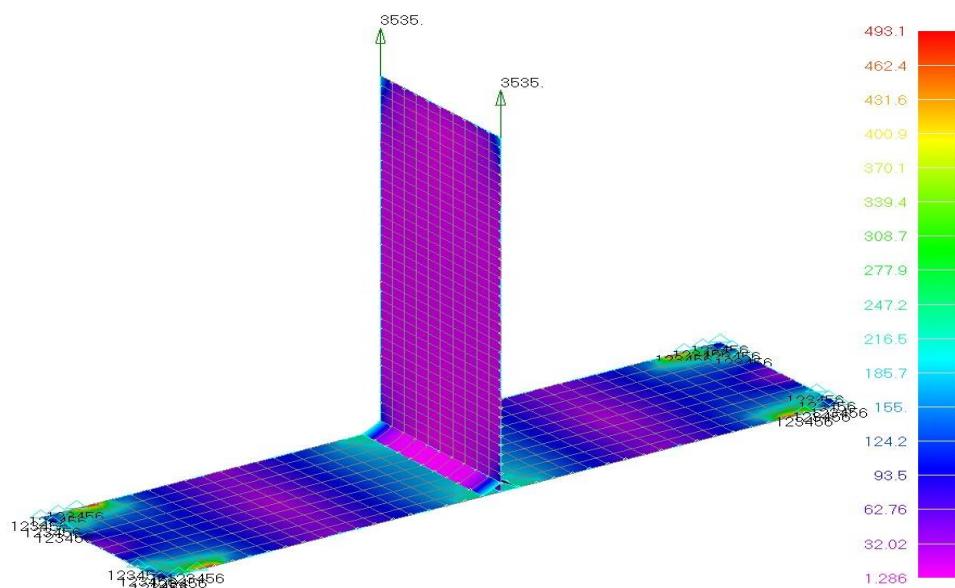
Табела 5.2. Резултати испитивања напона за љуску са моделираним завареним спојем елементом љуска – Von Mises и Номинални напон										
7033.Plate Top VonMises Stress				7020.Plate Top X Normal Stress				7021.Plate Top Y Normal Stress		
X	Y	ID		X	Y	ID		X	Y	ID
-29.25	164.0252	16		-29.25	-166.605	16		-29.25	-5.49598	16
-22.75	158.7665	33		-22.75	-166.23	33		-22.75	-16.6054	33
-16.25	155.5394	50		-16.25	-167.755	50		-16.25	-28.6134	50
-9.75	154.8979	67		-9.75	-169.951	67		-9.75	-36.8031	67
-3.25	154.9639	84		-3.25	-171.267	84		-3.25	-40.761	84
3.25	154.9639	101		3.25	-171.267	101		3.25	-40.761	101
9.75	154.8979	118		9.75	-169.951	118		9.75	-36.8031	118
16.25	155.5394	135		16.25	-167.755	135		16.25	-28.6134	135
22.75	158.7665	152		22.75	-166.23	152		22.75	-16.6054	152
29.25	164.0252	169		29.25	-166.605	169		29.25	-5.49598	169

У табели 2. приказани су резултати прорачуна добијених у програмском пакету FEMAP with NX Nastran[9]. Резултати приказани у табели 5.2, у колони Y, представљају вредности добијених напона, где колона ID представља редни број елемента који је разматран. Група елемената одабрана за анализу добијених резултата приказана је на слици 5.5.

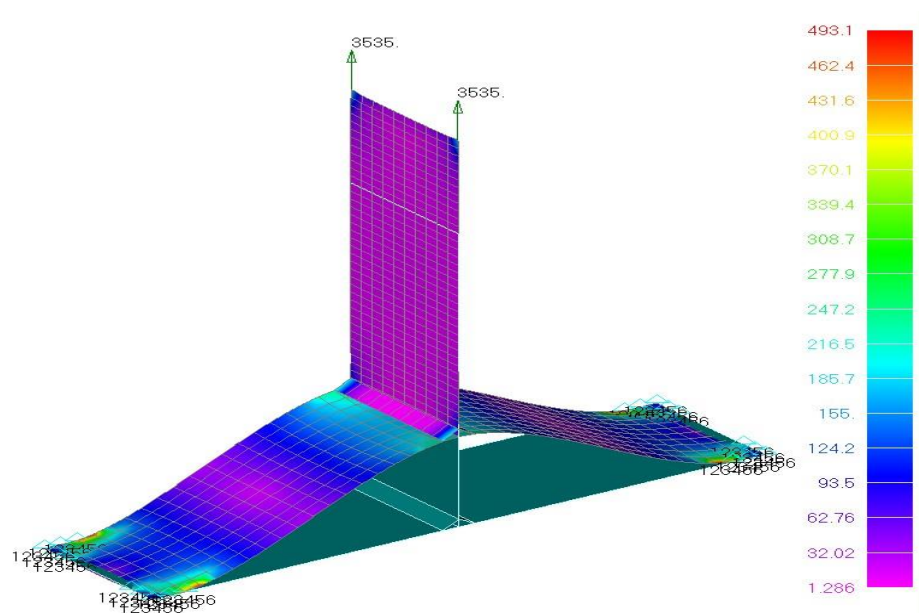


Слика 5.5. *Разматрана група елемената*

Поље VonMises-овог напона разматраног модела, приказано је на слици 5.6. Максимална вредност добијеног напона је 493МПа и налази се на местима ограничених чворова. Вредности VonMises-овог напона у оквиру разматране групе креће се у опсегу од 154МПа до 166МПа. Слика 5.7. представља деформисану конфигурацију разматраног модела на основу задатаих оптерећења и ограничења.



Слика 5.6. Поље VonMisses-овог напона разматраног модела



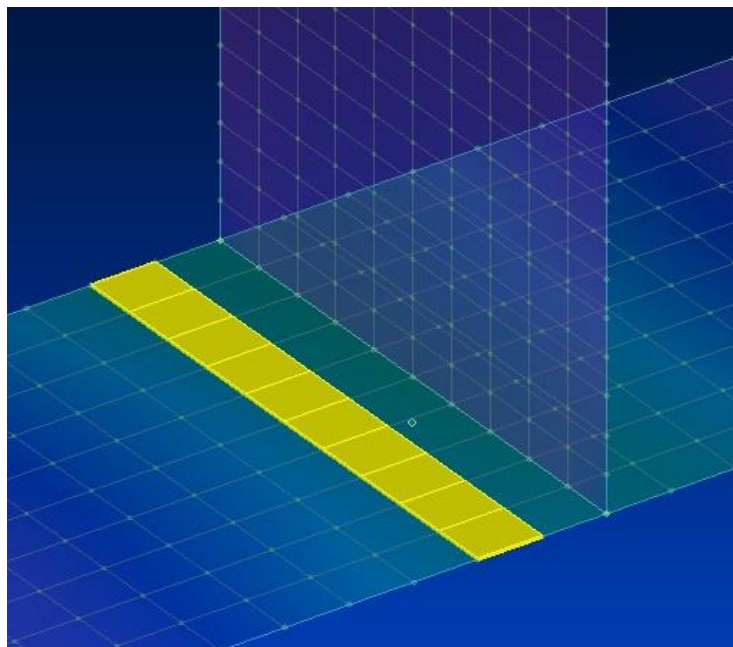
Слика 5.7. Деформисана конфигурација анализираног модела

5.2.2. Коначни елемент љуска без моделираног завареног споја

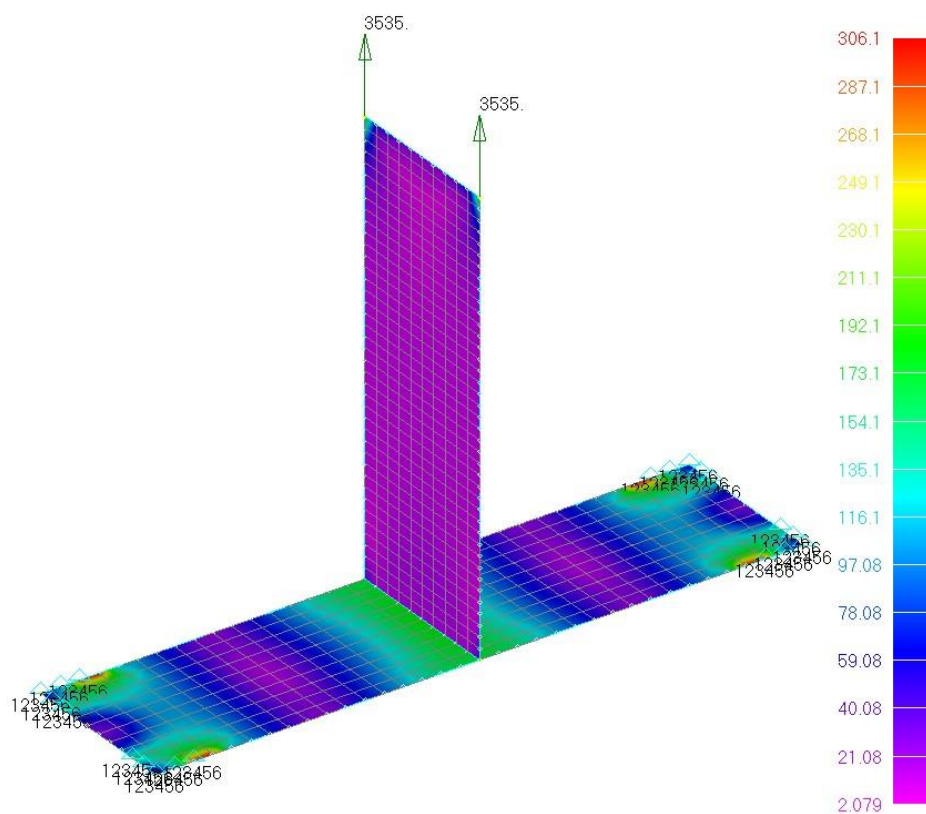
Овај модел није имао моделирани заварени спој. Модел смо оптеретили силом на затезање вредности од 3.535kN у два чвора и, фискирали у четири угла основне плоче у по шест тачака. То нам је омогућило добијање исте суме сила као и у случају солида и делмично поклапање вредности номиналног и Von Mises-овог напона.

Табела 5.3. Резултати испитивања напона без моделираног завареног споја – Von Mises и Номинални напон										
7033..Plate Top VonMises Stress				7020..Plate Top X Normal Stress				7021..Plate Top Y Normal Stress		
X	Y	ID		X	Y	ID		X	Y	ID
-29.25	164.0252	16		-29.25	-166.605	16		-29.25	-5.49598	16
-22.75	158.7665	33		-22.75	-166.23	33		-22.75	-16.6054	33
-16.25	155.5394	50		-16.25	-167.755	50		-16.25	-28.6134	50
-9.75	154.8979	67		-9.75	-169.951	67		-9.75	-36.8031	67
-3.25	154.9639	84		-3.25	-171.267	84		-3.25	-40.761	84
3.25	154.9639	101		3.25	-171.267	101		3.25	-40.761	101
9.75	154.8979	118		9.75	-169.951	118		9.75	-36.8031	118
16.25	155.5394	135		16.25	-167.755	135		16.25	-28.6134	135
22.75	158.7665	152		22.75	-166.23	152		22.75	-16.6054	152
29.25	164.0252	169		29.25	-166.605	169		29.25	-5.49598	169

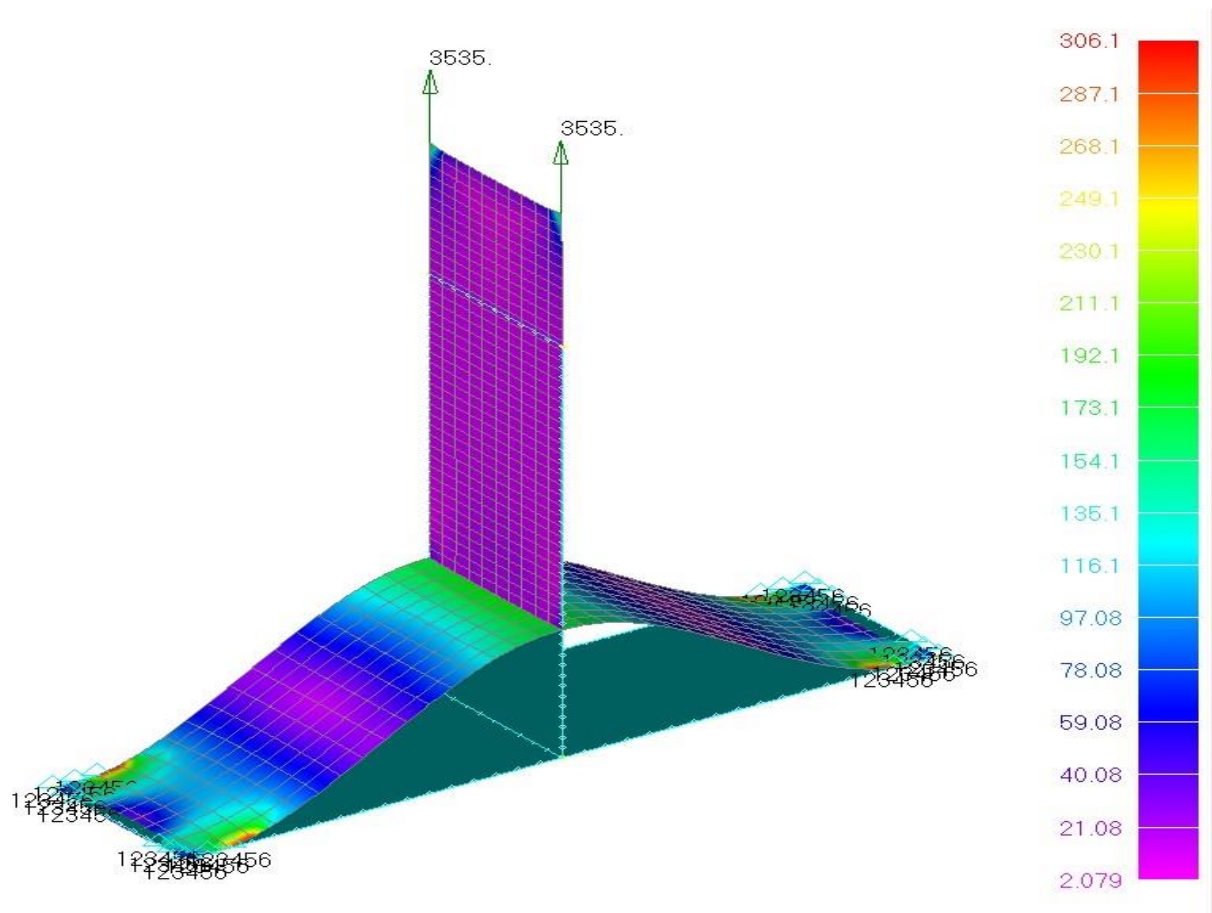
У табели 5.3. приказани су резултати прорачуна добијених у програмском пакету FEMAP with NX Nastran[9]. Резултати приказани у табели 3, у колони Y, представљају вредности добијених напона, где колона ID представља редни број елемента који је разматран. Група елемената одабрана за анализу добијених резултата приказана је на слици 5.8



Слика 5.8. Разматрана група елемената



Слика 5.9. Поље VonMisses-овог напона разматраног модела



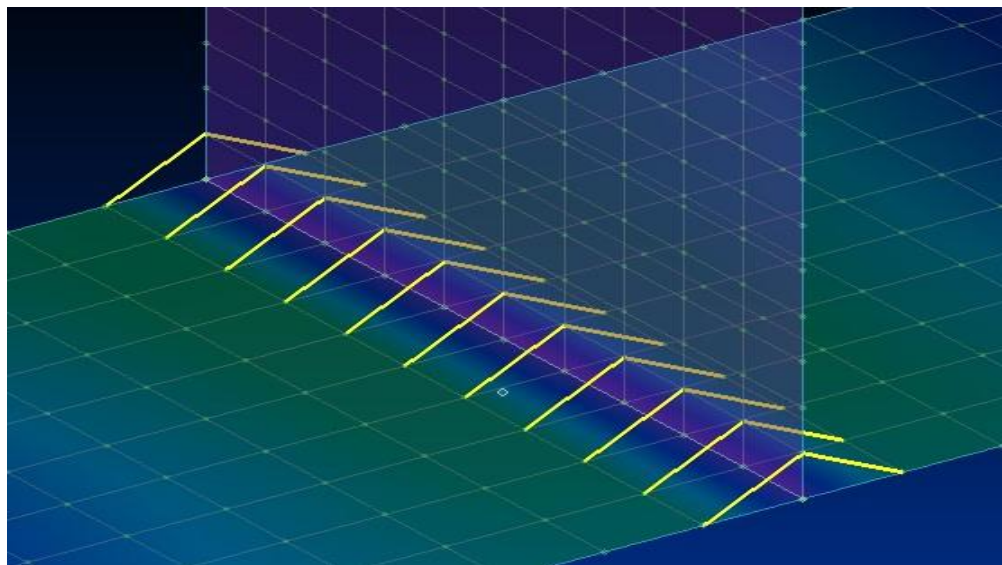
Слика 5.10. Деформисана конфигурација анализираног модела

Поље VonMises-овог напона разматраног модела, приказано је на слици 5.9. Максимална вредност добијеног напона је 306МПа и налази се на местима ограничених чворова. Вредности VonMises-овог напона у оквиру разматране групе креће се у опсегу од 154МПа до 164МПа. Слика 5.10. представља деформисану конфигурацију разматраног модела на основу задатаих оптерећења и ограничења.

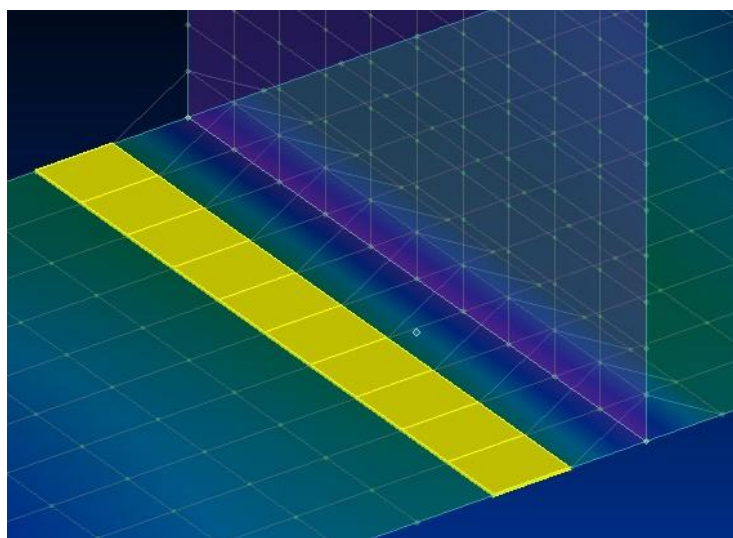
5.2.3. Коначни елемент љуска са моделираним завареним спојем чврстом везом

Последњи случај испитивања, у овом раду, је испитивање коначног елемента љуска где је заварени спој представљен као чврста веза између елемената хоризонталне и вертикалне плоче, слика 5.11. При моделирању завареног споја овом методом коришћена је опција MultiLinks у програму Femap. Овај модел није имао моделирани заварени спој. Модел смо оптеретили силом на затезање вредности од 3.535kN у два чвора и, фискирали у четири угла основне плоче у по шест тачака. Табела 5.4. представља вредности VonMises-овог и номиналног напона за задати случај. Група елемената одабрана за анализу добијених резултата приказана је на слици 5.12.

Табела 5.4. Резултати испитивања напона за љуску са моделираним завареним чврстом везом – Von Mises и Номинални напон										
7033. Plate Top VonMises Stress				7020. Plate Top X Normal Stress				7021. Plate Top Y Normal Stress		
X	Y	ID		X	Y	ID		X	Y	ID
-29.25	158.4634	16		-29.25	-165.836	16		-29.25	-19.4113	16
-22.75	161.6442	33		-22.75	-175.099	33		-22.75	-32.9213	33
-16.25	167.4134	50		-16.25	-184.427	50		-16.25	-42.2757	50
-9.75	170.1998	67		-9.75	-188.948	67		-9.75	-47.6961	67
-3.25	171.3688	84		-3.25	-190.861	84		-3.25	-50.1965	84
3.25	171.3688	101		3.25	-190.861	101		3.25	-50.1965	101
9.75	170.1998	118		9.75	-188.948	118		9.75	-47.6961	118
16.25	167.4134	135		16.25	-184.427	135		16.25	-42.2757	135
22.75	161.6442	152		22.75	-175.099	152		22.75	-32.9213	152
29.25	158.4634	169		29.25	-165.836	169		29.25	-19.4113	169

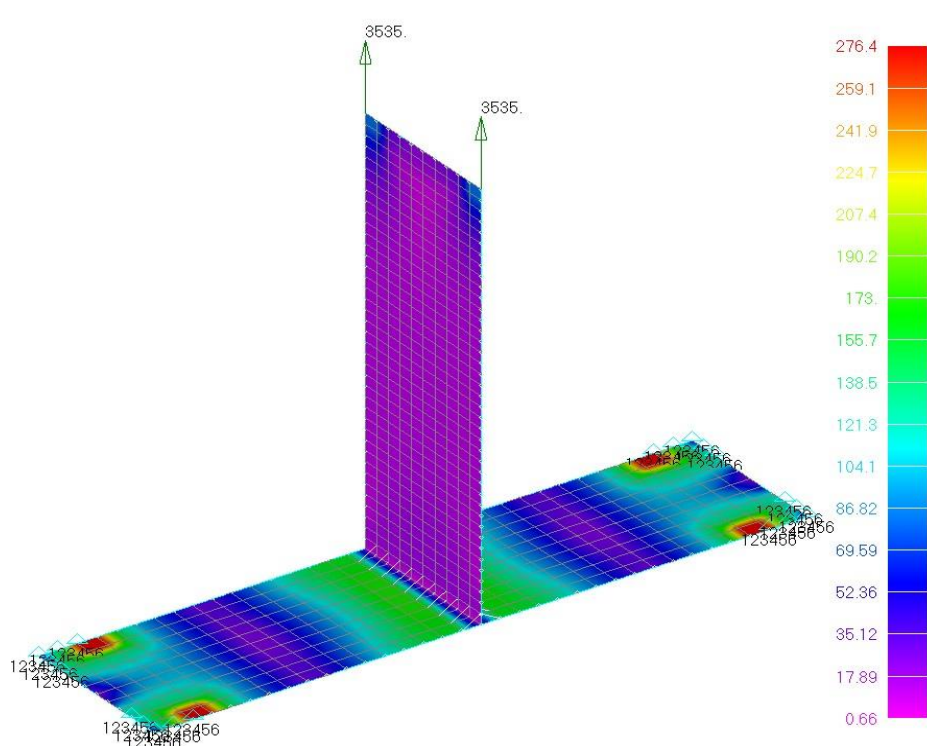


Слика 5.11.. *Илустрација повезивања вертикалне и хоризонталне полоче опцијом MultiLinks*

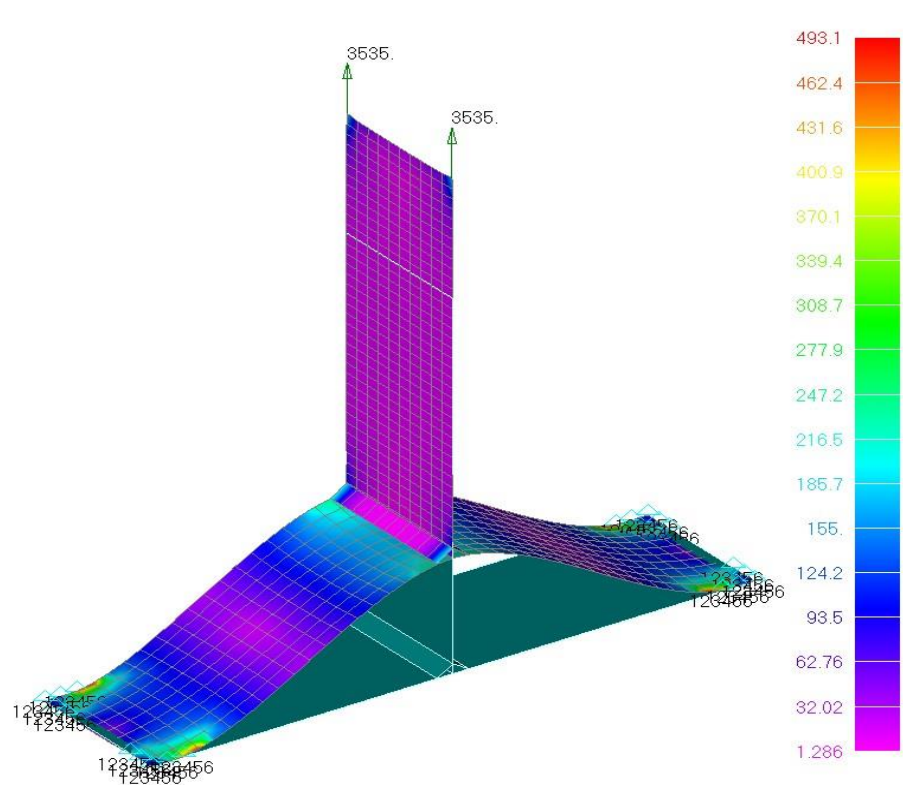


Слика 5.12. *Разматрана група елемената*

Поље VonMisses-овог напона разматраног модела, приказано је на слици 5.13. Максимална вредност добијеног напона је 276МПа и налази се на местима ограничених чворова. Вредности VonMisses-овог напона у оквиру разматране групе креће се у опсегу од 158МПа до 171МПа. Слика 5.14. представља деформисану конфигурацију разматраног модела на основу задатаих оптерећења и ограничења.



Слика 5.13. Поље *VonMises*-овог напона разматраног модела



Слика 5.14. Деформисана конфигурација анализираниог модела

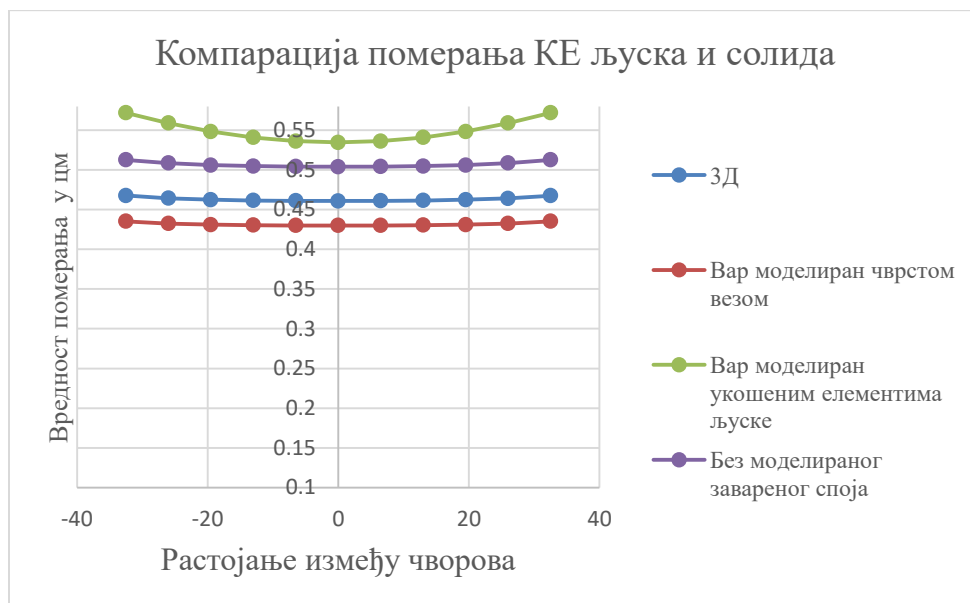
5.3. Упоредни приказ добијених резултата

У претходним поглављима рада, приказани су сви резултати добијених на основу анализа различитих врста модела. У табели 5.5. су приказане упоредне вредности добијених померања за сва 4 модела. На основу приказаних резултата можемо закључити да иако 3Д коначни елементи дају најбоља решења, за моделирање завареног споја конструкција просте геометрије можемо користити коначни елемент. На слици 5.15. дат је упоредни приказ вертикалних померања разматраних група одговарајућих модела.

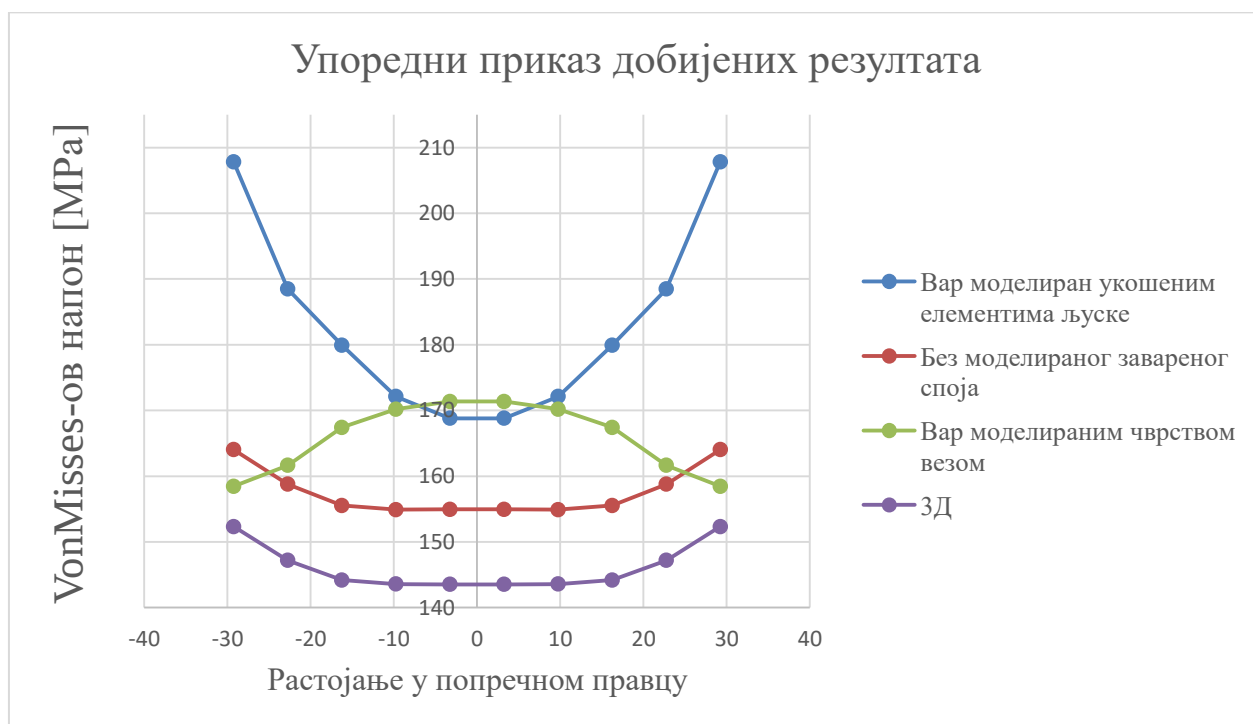
Табела 5.5. Вредности померања испитиваних модела									
Солид				Љуска			Са чврстом везом	Са елементом љуска	Без моделираног завареног споја
X	Y	ID		X	ID				
-32.5	0.467744	1029		-32.5	16		0.432429	0.558974	0.508604
-26	0.464342	1053		-26	69		0.431078	0.548436	0.506156
-19.5	0.4625	1052		-19.5	85		0.430427	0.540844	0.504865
-13	0.461555	1051		-13	101		0.430132	0.536287	0.504266
-6.5	0.461116	1050		-6.5	117		0.430049	0.534768	0.504094
0	0.460991	1049		0	133		0.430132	0.536287	0.504266
6.5	0.461114	1048		6.5	149		0.430427	0.540844	0.504865
13	0.461539	1047		13	165		0.431078	0.548436	0.506156
19.5	0.46245	1046		19.5	181		0.432429	0.558974	0.508604
26	0.46424	1045		26	197		0.435362	0.571917	0.512753
32.5	0.467571	1028		32.5	30		0.435362	0.571917	0.512753

На основу поређења експерименталних и нумеричких резултата датих у раду [3] закључено је да се нумерички резултати добијени коришћењем 3Д елемената најбоље поклапају са експерименталним резултатима. Слика 5.16 представља компарацију резултата VonMisses-ових напона добијених анализом сва четири модела. На основу дијаграма можемо да закључимо да се у напонском домену резултати анализе готово поклапају а да су резултати за коначни елемент љуске где заварени спој није моделиран добро поклапање са 3Д моделом. Такође можемо коментарисати да резултати за КЕ љуске

где је заварен спој моделиран укошеним елементима љуске даје веће вредности на спољним елементима разматране групе док елементи који се налазе на средини дају знатно боље и прецизније резултате. Ову појаву можемо објаснити тј. преписати крутости коначног елемента љуске у софтверском пакету који за разлику од 3Д коначних елемената нема опцију задавања чврстоће.



Слика 5.15. Упоредни приказ добијених резултата - Померања



Слика 5.16. Упоредни приказ добијених резултата - Напон

Закључак

У овом раду извршена компаративна анализа нумеричких резултата до којих се дошло различитим начинима моделирања заварених спојева. Као илустративни пример ишкоришћен је Т-профил једноставне геометрије настао заваривањем одговарајућих плоча, да би што лакше искоментарисали добијене резултате анализа. Циљ је био да се утврди која од представљених метода са аспекта брзине моделирања и поузданости добијених резултата је најмеродавнија и може се у будућности поуздано користити при прорачуни заварених конструкција сложене геометрије. .

На основу анализе изведени су закључци да модел састављен од 3Д коначних елемената даје најпоузданија решења. Експерименталне вредности, које су узете из рада [3], нам говоре да су 3Д коначни елементи најбољи за прорачун заварених спојева методом коначних елемената. Међутим за прављење МКЕ модела сложених геометрија 3Д елементима, потребно је далеко више времена за моделирање него 2Д елементима - љуска. Због тога је постављен још један од циљева да се и другим техникама моделирања (2Д елементи - љуска) провери њихова тачност и евентуална будућа примена на комплексније конструкције.

Због тога направљена су још три модела Т-профила где су основне плоче моделиране коначним елементом љуске, док је сам заварени спој моделиран укошеним елементом љуске, крутом везом и модел у коме није уопште моделиран сам заварени спој. Анализом добијених резултата показано је модел где заварени спој није био моделиран даје најприближније резултате као и модел састављен од 3Д коначних елемената. Вредности добијених напона су мало изнад вредности које даје Т модел састављен од 3Д коначних елемената што је свакако на страни сигурности што се тиче поузданости саме конструкције. Добијене вредности за друга два модела где је моделиран заварени спој су имала већа одступања у односу на модел састављен од 3Д коначних елемената.

На основу свега приказаног у раду, може се закључити да се за прорачун сложених конструкција не мора искључиво користити модел састављен од 3Д коначних елемената, већ да се могу користити и једноставнији модели. На тај начин дошло би до знатне уштеде у времену и напору неопходном за креирање МКЕ модела.

Поред свега наведеног из самог рада постављени су и неки циљеви за будућа истраживања. Планирано је да се изврше експериментална испитивања на кидалици где би се у околини завареног споја поставиле мерне траке које би нам послужиле као потпуна верификација проблема који је изложен у овом раду.

Литература:

- [1] Милош Којић, Радован Славковић, Мирослав Живковић, Ненад Грујовић, Метод коначних елемената 1- Линеарна анализа, Крагујевац, 1998.
- [2] Development of a Finite Element Based Nominal Stress Extraction Procedure for Fatigue Analysis of Welded Structures, Alewyn Petrus Grové, Department of Mechanical and Aeronautical Engineering, University of Pretoria, September 2006.
- [3] Modelling and fatigue life assessment of orthotropic bridge deck details using FEM Mustafa Aygöl, Mohammad Al-Emrani, Shota Urushadze, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Prague, Czech Republic, 2011.
- [4] Schijve, J., Fatigue of structures and materials, Springer Netherlands, 2009.
- [5] A. Erikson, A. M. Lignell, C. Olsson and H. Spennare, Weld Evaluation Using FEM: A Guide to Fatigue-loaded Structures, Gothenburg: Industrilitteratur, 2003.
- [6] J. L. Fayard, A. Bignonnet and K. Dang Van, "Fatigue Design of Welded Thin Sheet Structures," European Structural Integrity Society, vol. 22, p. 145–152, 1997.
- [7] E. Niemi, Stress Determination for Fatigue Analysis of Welded Components IIW doc. IIS/IIW-1221-93, Cambridge: A volume in Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies, 1995.
- [8] H. Dannbauer, C. Gaier and K. Hofwimmer, "Fatigue Simulation of Welded Structures," Magna Steyr, Engineering Center Steyr, Temadagg Oslo, 2004.
- [9] Femap with NX Nastran