

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Машинске конструкције и механизација

Предмет: Лаке конструкције

Број индекса: 364/2015

Владимир Г. Петровић

**Прорачун сложено оптерећених танкозидних
носача према Еврокоду**

Комисија за преглед и одбрану:

1. **Др. Весна Марјановић, ментор**

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог мастер рада треба да буду обрађене следеће теме:

- Основе прорачуна металних конструкција
- Посебни захтеви при прорачуну танкозидних конструкција
- Секторске карактеристике танкозидних профила
- Анализа напона сложено напрегнутих танкозидних носача

Литература:

- [1] Петковић З., Оштрић, Д., Металне конструкције у машиноградњи, Центар за механизацију, Београд 1996.
- [2] Буђевац Д., Марковић, З., Боговац, Д., Тошић, Д., Металне конструкције – Основе прорачуна и конструисања, Београд 1997.
- [3] Марковић З., Гранична стања челичних конструкција према Еврокоду, Београд 2014

Крагујевац, 23.10.2017

Ментор: _____

Садржај

1. Увод.....	1
2. Историјски развој металних конструкција.....	3
3. Основни конструктивни елементи	7
4. Основе прорачуна конструкција.....	13
4.1 Прорачун према методи допуштених напона	14
4.2 Прорачун према теорији граничних стања.....	18
4.3 Прорачун према Еврокоду	19
5. Димензионисање носача.....	22
5.1 Контрола напона	23
5.2 Контрола деформација	25
5.3 Контрола стабилности на бочно-торзијско извијање.....	26
5.4 Комбиновано напрезање	28
5.4.1 Савијање и смицање	28
5.4.2 Савијање и аксијална сила	29
5.4.3 Косо савијање	29
5.4.4 Савијање, смицање и аксијална сила	30
5.4.5 Савијање и торзија	31
5.4.6 Савијање, смицање и торзија.....	31
5.5 Одређивање секторских координата.....	32
6. Пример прорачуна танкозидних носача	35
6.1 Одређивање секторских карактеристика.....	39
6.2 Напонска анализа профила - Robot Structural Analysis	46
6.3 Напонска анализа и деформације профила - CATIA.....	60
7. Закључак	65
Литература.....	66

Резиме

Циљ овог рада је анализа начина прорачуна сложено оптерећаних танкозидног профила. Описан је историјски развој металних конструкција, приказан је теоријски део прорачуна, секторске карактеристике и начин одређивања дијаграма секторских координата. На крају урађен је аналитички прорачун танкозидног профила и напонска анализа.

Кључне речи: профил, секторске карактеристике, напон

Abstract

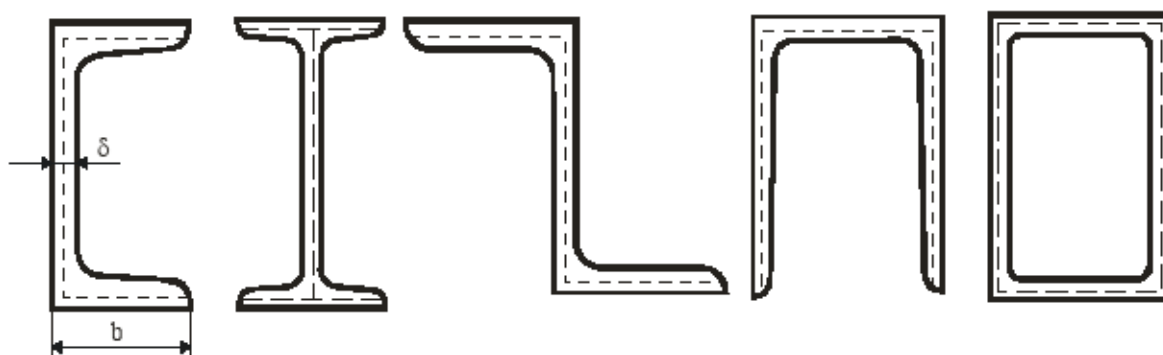
The aim of this paper is to calculate a thin-walled profile. The historical development of metal structures is described, the theoretical part of the calculation, the sectoral characteristics and the way of determining the diagrams of the sector coordinates is presented. Finally, the analytical calculation of the thin-walled profile and the voltage analysis was done.

Key words: calculate, profile, the sector coordinates, stress analysis

1. Увод

Појам Металне конструкције потиче из области грађевинарства и везан је за материјал од кога се конструкција изграђује. Поводом тога разматрају се разне специфичности, као што су: прорачун, пројектовање и израда носећих структура конструкција широког спектра намене, како у грађевинарству тако и у машинству. Под лаким конструкцијама подразумевају се конструкције са танким зидовима. Под танкозидним штапом подразумева се такво теле чије су све три димензије величине различитих редова, то јест дужина је много већа од попречног пресека, а ширина попречног пресека је много већа од дебљине зида, слика 1.1. . Испрекидана линија (средња) означава контуру попречног пресека.

$$l \gg b(s) \gg \delta$$



Слика 1.1 Попречни пресеци профила [2]

Под штапом у механици деформабилних тела, подразумева се чврсто деформабилно тело малих димензија попречног пресека. Најважнија предност танкозидних носача је повољан однос између њихове отпорности и властите тежине. Остале предности који произилазе из мале тежине су: лагана израда, једноставан транспорт, лагана и брза монтажа

Под појмом металне конструкције подразумевају се конструкције које се потпуно или делимично израђују од метала. Као основни материјал за носеће металне конструкције највише се користи челик, али се у новије време све више користи алуминијум и његове легуре. Челик је легура гвожђа и угљеника чији се садржај у легури креће од 0,05 до 1,7 %. Челик се може обрађивати деформацијом (ваљање, ковање), док се то не може вршити ливеним гвожђем, због његове тврдоће и крутости. Употреба алуминијума због његове мале тежине је све чешћа, посебно у авио и аутомобилској индустрији. Поред ових материјала потребно је поменути и постојање потпуно нових конструктивних материјала, као што су композитни материјали, пластичне смесе (полимери) и металне пене. Ипак

према предвиђањима научника из области конструкција и материјала, и у наредном временском периоду челик ће остати основни конструкциони материјал. [1]

Танкозидни носачи се користе у савременим инжењерским конструкцијама, и имају широку примену, користе се у: зградарству (подни носачи, решеткасти носачи, стакленици, фасадне и кровне облоге), мостоградњи,

За одређене производе челик је доминантан материјал, поготово тамо где се постављају врхунски захтеви за квалитетом и обрадом материјала. Челичне конструкције поседују специфична својства и значајне технике и функционалне предности у односу на друге материјале, и зато имају широку примену за све врсте конструкција. Челик се користи скоро за све типове објеката, као што су:

- индустријске хале,
- дизалице (кранови),
- транспортни уређаји, роторни багери
- спратне зграде,
- хангари,
- кровови стадиона,
- мостови,
- резервоари,
- силоси,
- стубови и
- многе друге конструкције за специјалне намене.

Као материјал за носеће конструкције челик поседује изузетне карактеристике у које спадају: висока механичка својства, мале димензије, мале тежине елемената челичних конструкција, лака манипулација, велика сеизмичка отпорност, могућност демонтаже и трајна вредност.

2. Историјски развој металних конструкција

Употреба гвожђа, а потом и челика, као материјала за носеће конструкције релативно је скоријег датума. Руда гвожђа се у природи углавном јавља као ферит, магнетит, хематит, лимонит и пирит. Да би се гвожђе могло користити руда се мора ослободити знатних количина нечистоћа. Дуги низ година археолози су покушавали да открију ко је био проналазач гвожђа. Енглез Хил је при истраживању Кеопсове пирамиде пронашао у зидинама парче гвожђа, чија старост достиже преко 5000 година.

Вештина ливења гвожђа и гвоздених предмета старим народима није била позната, јер се ливено гвожђе јавља тек у 15. веку. Тек проналаском поступка добијања сировог гвожђа помоћу кокса у високим пећима 1735. године, омогућена је већа производња сировог гвожђа, а тиме и његова широка примена. Примена гвожђа у конструкцијама била је углавном ограничена на побољшање познатих техника спајања елемента, завртњеви почињу да се производе од средине 16. века. конструкција од гвожђа стара је нешто више од 200 година, подигнута је у периоду од 1777.-1779. Године у месту Колбрукдејл у Енглеској преко реке Северн, од стране Абрахама Дарбија (Abraham Darby), слика 2.1.



Слика 2.1 *Мост преко реке Север [3]*

Мост је лучни, дужине 30,6 m, са стрелом од 13,7 m. Мост се састоји од пет сегментних лукова на три зглоба на размаку од 1,5 m. Мост је и данас у употреби и служи за пешаке. После ове конструкције изграђен је лучни мост преко реке Вер код Сандерленда (у Енглеској) 1796. године. Дужина моста је 72 m.

На слици 2.2, и слици 2.3 приказане су машине као средства механизације одговарајућих процеса.



Слика 2.2 Мосна дизалица



Слика 2.3 Роторни багер

Историја руковања материјала сеже у далеку прошлост. Различите технике руковања материјалом, различити облици механичких направа, коришћени су током развоја људског друштва. Потреба за руковањем материјалом, била је присутна увек када моћ

човека као појединца или групе људи није била довољна за транспорт и подизање тешких терета.

Проналаском парне машине поступак за добијање гвожђа у високим пећима је постајао све ефикаснији због употребе машине на парни погон за удубљавање претходног загрејаног ваздуха. Године 1784. Хенри Корт (Henry Cort) је пронашао пудел процес, односно поступак производње вареног гвожђа. У пудел пећима се сирово гвожђе из високих пећи доводом загрејаног ваздуха и сталним мешањем ослобађало од угљеника, силицијума и мангана.

Француски инжењер Фердинанд Зорес 1839. Године успео је да изваља први I профил, а затим и U профил. Од овог материјала изведен је мост Британија (Britannia) преко мореуза Менеј, 1850. године. Конструкција моста састојала се од два одвојена паралелна сандучаста носача кроз које пролазе возови. [3]

Крајем 19. Века установљен је математички апарат за моделирање понашања челичних конструкција, у домену линеарно-еластичног понашања. Велика носивост челика најбоље је искоришћења за изградњу мостова великих распона, различитих статичких и конструкцијских система.

За мостове лучног система Французи имају највеће заслуге. Први лучни мост назван је Arcole од вареног гвожђа којег је саградио Одри (Oudry) 1854. Године у Паризу. Такође и мост Garabit је један од најзначајнијих лучних мостова. Година 1881. везана је за почетак електролучног заваривања. Први мост на свету који је израђен заваривањем био је мост на Слудви у Пољској 1928. Године. Од великих америчких висећих мостова треба истаћи два највећа, а то су George Washington преко реке Хадсон у Њурорку који је завршен 1923. Године и Golden Gate у Сан Франциску који је завршен 1937. Године.

Својства вареног гвожђа омогућила су израду смелијих конструкција. Прогрес у грађењу мостова и кровова од вареног гвожђа брзо се проширио на развијене земље, што је захтевало производњу нових облика носећих елемената. На тај начин дошло је до појаве првих профила.

Године 1855 проналазак топљеног челика имао је велики значај за развој металних конструкција. Први значајан мост од челика направљен је 1874. године. То је био мост Сент Луис преко реке Мисисипи.

До друге половине 19. века челик се није производио у великим количинама. Увођењем Сименс-Мартиновог, а нарочито Томасовог поступка омогућена је после 1880. Године масовна производња челика, доброг квалитета, такозваног топљеног челика који је и дан данас у употреби. Прва значајна конструкција од челика је монументални Forth Bridge који је завршен 1889. године. Мост је решеткаст, тежина конструкције је 53,305 тона, са уграђених 6.500.000 закивака.

На основу нових сазнања и савремених технологија 1964. године у Америци саграђен је мост Verazzano Narrows са највећим распоном на свету. Мост је двоспратан, друмски са 12 коловозних трака. Затим је 1981. године саграђен још један мост великог распона преко реке Хамбер у Великој Британији. Са развојем технологије, самим ти долази и до развијања металних конструкција која се све више користе у свим сферама живота.

Прописи, прорачуни и пројектовање конструкција нису појмови који су блиски првим конструкторима и градитељима у историји, мада им то није сметало да подигну велелепне објекте којима се и данас дивимо. Они су углавном били вођени интуицијом, примерима из природе, пропорцијама и сличношћу а првенствено искуством. Управо то искуство подпомогнуто развојем теоријских дисциплина, механике и отпорности материјала, доводи и да првих рачунских метода. Крајем XIX века установљен је математички апарат за моделирање понашања металних конструкција у домену линеарно-еластичног понашања. Имајући у виду да се челик до достизања границе развлачења понаша по Хуковом закону као идеално еластичан материјал, достизање напона на граници развлачења означено је као почетак лома конструкције односно критеријум за њено димензионисање. На овој претпоставци заснована је теорија допуштених напона.

Дуги низ година прописи за прорачун металних конструкција били су засновани на концепту допуштених напона. Савремени начини прорачуна који се постепено уводе и у нашој земљи а увелико су заживели у Европској Унији задњих тридесетак година, засновани су на теорији граничних стања, коју прописују најновији европски стандарди—ЕВРОКОДОВИ. Ове промене настале су пре свега због тежње конструктора да се приближе реалном понашању челичних конструкција и искористе пост-еластичне резерве које челик као изразито еласто-пластичан материјал поседује. Граничним стањима се називају она стања конструкције чијим достизањем, односно прекорачењем, конструкција престаје да испуњава прописане услове носивости или употребљивости, и могу се поделити на две суштински различите групе: гранична стања носивости (ULS - Ultimate Limit State) и гранична стања употребљивости (SLS - Serviceability Limit State)

Нови прорачуни по овим стандардима заснивају се на пробабилистичким методама прорачуна које се ослањају на стохастички природу случајних променљивих и теорију вероватноће. Већина променљивих које фигуришу у прорачуну конструкција као што су оптерећења—дејства на конструкције (снег, ветар, сеизмика, температура, људска кретања, саобраћајно оптерећење...), својства материјала и геометријски подаци су стохастичке величине и подлежу законима вероватноће. Све ове величине треба увести у прорачун помоћу одговарајућих кривих расподеле са циљем да се оствари тражени степен сигурности, односно да је вероватноћа да дође до отказа или лома конструкције задовољавајуће мала. Због велике сложености оваквих метода, претпостављено је да за све важи иста крива расподеле - нормална, то јест Гаусова функција расподеле. Ове методе

прорачуна називају се полу-пробабилистичке или семи-пробабилистичке и представљају основ за већину прописа за прорачун металних конструкција по Еврокоду.

3. Основни конструктивни елементи

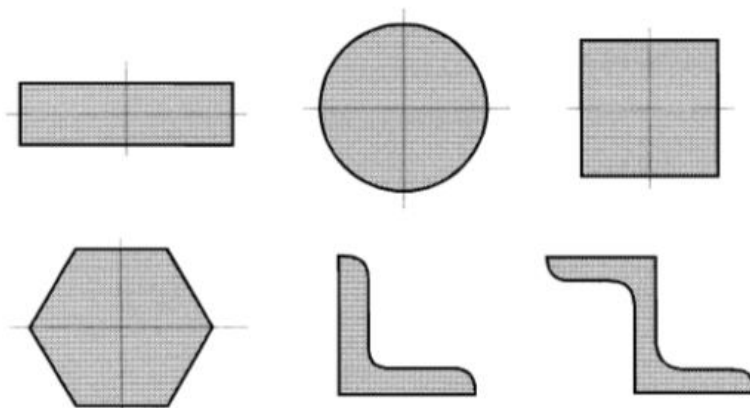
Челик има велику јачину и приближно исту отпорност према силама које га истежу, притискају или савијају. Челик је еластичан и понаша се по Хуковом закону до високих напрезања. Конструкција од челика под оптерећењем се мало савијају, јер је модул еластичности челика велики. Челик се излива у калупе (инготе), који се у топлом стању преносе у ваљаоницу. Када се хлађењем постигне температура ваљања, инготи се пропуштају кроз ваљаонички стан у више пролаза. Крајњи производи ваљања представљају конструктивне елементе.

У основне конструктивне елементе спадају:

1. штапови,
2. лимови и
3. профилисани носачи.

3.1 Штапови се израђују у различитим облицима, а попречни пресеци неких од њих приказани су на слици 3.1. Основни облици штапова су:

- пљоснати,
- округли,
- квадратни,
- шестоугаони,
- угаоници,
- профилни.



Слика 3.1 Основни попречни пресеци штапова [3]

Пљоснати се ваљају у дебљинама од 3 до 100 mm и ширинама од 8 до 150 mm. Универзални или пљоснати штап је правоугаоног попречног пресека, ваљан са 4 ваљка, два хоризонтална и два вертикална. Широки пљоснати штап углавном се користи за израду појасних ламела (ножица) заварених I профила. Округли се ваља на пречнике од 5 до 300 mm. Квадратни се ваља на профиле од 5 до 300 mm. Шестоугаони се такође ваља на профиле од 5 до 300 mm. Угаоници се добијају ваљањем калибрираних ваљака. Краци угаоника стоје под правим углом и они су или истих дужина или различити. Свака врста угаоника израђује се у 3 или 4 дебљине. Профили се ваљају са високим ребром, где је висина профила једнака дужини, највише до 160 mm, или са широком ножицом, где је висина профила дупло већа од дужине, највише до 200 mm.

2. Лимови се ваљају између два равна ваљка, на такав начин да се обрађују у оба правца и немају равне ивице, и морају се обрезивати. Лимови се деле: према облику, квалитету обраде површине и према дебљини. Према облику лимови могу да буду:

- равни,
- таласасти,
- коритасти и
- удубљени.

Према квалитету обраде лимови могу да буду:

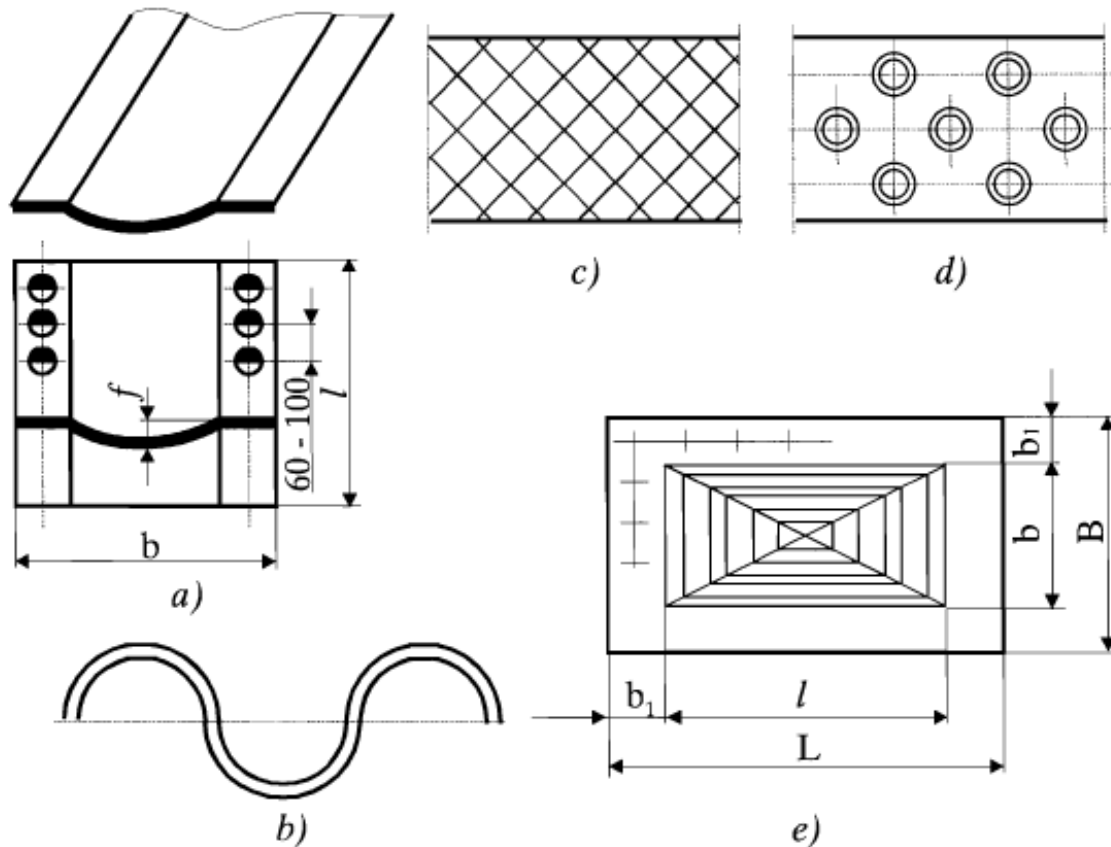
- глатки,
- ребрасти,
- брадавичасти и
- бушени.

Према дебљини лимови могу да буду:

- фини, дебљина до 3 mm,
- средњи, дебљина до 4.75 mm,
- груби, дебљина преко 4.75 mm.

Равни лимови код нас се израђују до 2000 mm у ширини, а до дебљине од 20 mm и дужинама од 6 до 12 m. Коритасти лимови се израђују пресовањем равних лимова у хладном стању, дужина им је до 6 m, ширина ножица од 60 до 150 mm и дебљина од 5 до 10 mm. Удубљени лимови се израђују од грубих равних лимова пресовањем у усијаном стању. Плоча може бити квадратна, правоугаона, трапезаста или троугласта. Израђују се у димензијама до 3 m, а ширине ножица од 60 до 150 mm. Ребрасти и брадавичасти израђују се у усијаном стању са удубљенима од 1 до 2 mm. [2]

Неки облици лимова приказани су на слици 3.2



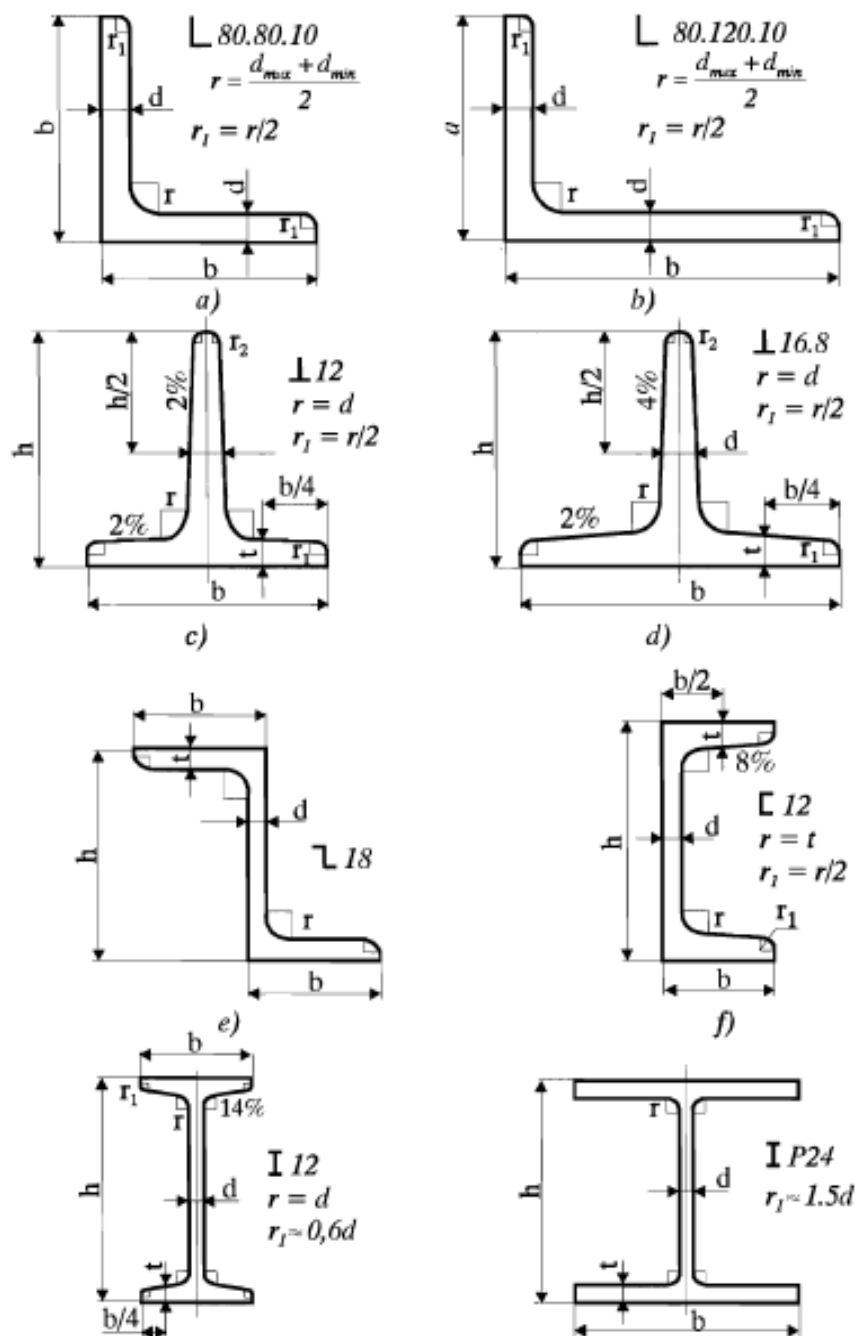
Слика 3.2 Облици лимова [3]

3. Профилисани носачи најчешће се ваљају у два основна облика, I профил и U профил, поред ова два профила користе се још и L, P, Z профили. I профили су основни конструкциони елементи за гредне и оквирне носаче, као и за стубове. Потреба за већом крутошћу при савијању довела је до увођења I профила са широком паралелном ножицом познатом под називом IP- носачи.

Из ове категорије профила највећу примену имају такозвани европски IPE - профили. Данас се ваљају из разлога повећања економичности I профила са широким ножицама. Разликују се лака серија HEA(IPB1), нормална серија HEB (IPB) и ојачана серија HEM (IPBv). Код нормалних ваљаних I профила услед технике ваљања условљен је унутрашњи нагиб ножица од 14%. Ови профили имају уску ножицу па је зато њихов момент инерције релативно мали у односу на површину пресека. U профил се такође често користи јер су погодни за комбиновање са лимовима и међусобно. Носачи су

конструктивни облици који се услед дејства оптерећења превасходно оптерећени на савијање.

На слици 3.3 приказани су попречни пресеци и основне димензије профилисаних носача.



Слика 3.3 Профилисани носачи [3]

Према конструктивом извођењу носачи могу да буду:

- решеткасти и
- пуни носачи.

Решеткасти носачи примењују се када конструкција треба да пренесе оптерећење преко великог распона или дохвата. Примена решеткастих носача код машина за механизацију је готово обавезна код: грађевинских стубних дизалица, великих роторних багера, претоварних мостова великог распона.

Код пуних носача појасеви профила међусобно су везани по целој дужини. Према начину израде пуни носачи могу бити:

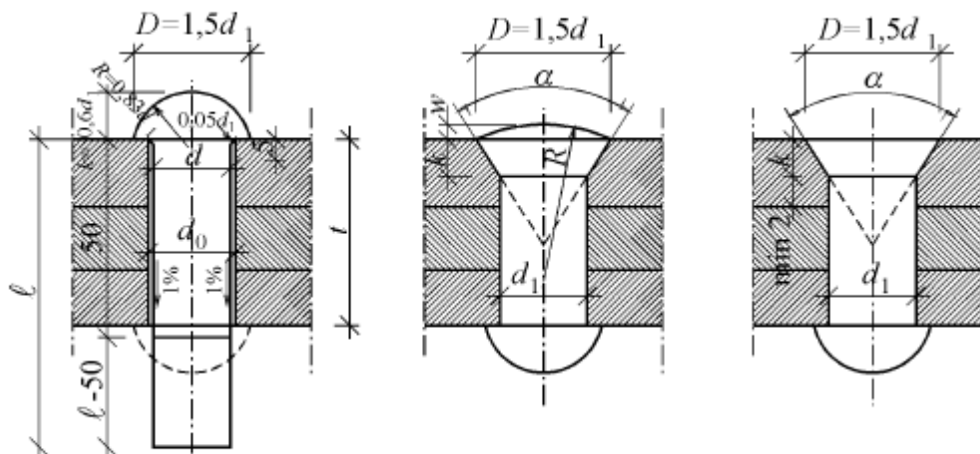
- ваљани и
- лимени.

Конструкцијски систем неког објекта сачињава више различитих елемената који чине јединствену целину, способну да преноси предвиђено оптерећење. Потребна за настављањем елемената произилази из чињеница да димензије конструкцијских елемената често превазилазе стандардне дужине ваљалоничких производа и габарите уобичајних транспортних средстава. Лимови и штапови се склапају у елементе конструкција. Због ограничене дужине елемената елементи се настављају. Настављање елемената се постиже елементима за везу, а то су:

- закивци,
- завртњеви,
- чепови и
- шавови.

Закивци често замењују везу заваривањем уколико би она изазвала промену механичких особина материјала. Везе изведене закивцима се добро понашају, како при статичком тако и при динамичком напрезању, јер закивци врше равномерни пренос силе дуж везе. Израђују се у пресама од округлог челика - при изласку из пресе закивак има једну готову главу и врат. Према облику закивци се деле на:

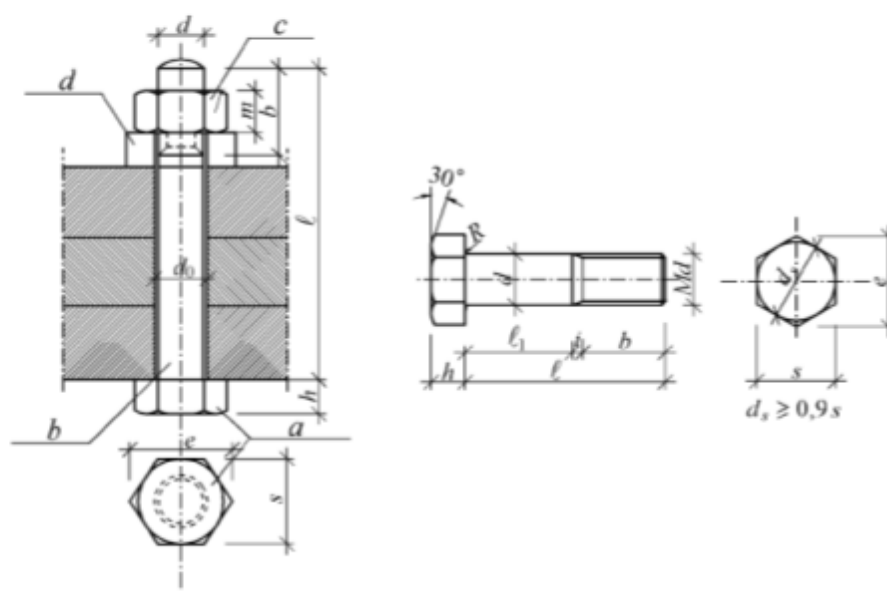
- закивке са полукружном главом,
- закивке са полуупуштеном главом,
- закивке са упуштеном главом, слика 3.4.



Слика 3.4 Различите врсте закивака [3]

Прва средства за везу код металних конструкција били су завртњевеи, слика 3.5. Они су међутим врло брзо замењени закивцима због скупе машинске израде и слабе отпорности на замор. Завртњевеи се углавном примењују код монтажних конструкција. Омогућавају брзо, једноставно остваривање везе између два или више елемената. Један комплет завртњева састоји се из следећи делова:

- шестоугаоне главе,
- цилиндричног тела које се завршава навојем,
- шестоугаоне навртке.



Слика 3.5 Делови и ознака димензија обичних завртњева [3]

Чепови се примењују код изузетно великих конструкција за оне везе где се претпоставља промена угла између спојених елемената. У оваквим конструкцијама чепови су углавном коришћени за израду чворова код решеткастих носача и за остваривање веза ланчаника. Везе са чеповима се конструишу помоћу окастих штапова и чепова. Понашање оваквих веза је комплексно, јер постоји велики број утицајних фактора који утичу на расподелу напона. Најважнији фактори су: облик и димензија окастог штапа, однос пречника чепа и димензија окастог штапа, зазор између чепа и рупе на окастом штапу. Сваки елемент који улази у везу мора да има довољну додирну површину са чепом да би предао своје оптерећење. Чеп се испитује на смицање и момент савијања. [3]

4. Основе прорачуна конструкција

Прорачун и димензионисање челичних конструкција врши се према правилима отпорности материјала, теорије еластичности и лаких конструкција. Прорачун је основа за конструктивну документацију, која треба да садржи све потребне елементе за усвајање технолошког процеса и саму реализацију конструкције. Већина променљивих величина које фигуришу у прорачуну конструкција као што су оптерећења (снег, ветар, висока или ниска температура...), својства материјала, и геометријски подаци су стохастичке величине и подлежу законима вероватноће. Све ове величине потребно је увести у прорачун помоћу одговарајућих кривих расподела, међутим примена оваквих прорачуна је врло сложена и захтевна, па као таква није примерена инжењерској пракси. Савремени прорачуни се раде уз примену рачунара користећи програмске пакете, који омогућавају да резултати прорачуна одговарају што ближе стварном стању оптерећене конструкције. Нарочиту пажњу треба обратити на моделирање контурних услова (веза и оптерећења), што директно утиче на валидност самог прорачуна. [4]

Да би се конструкција сматрала поузданом она мора да прихвати сва дејства и утицаје који ће се јавити током њеног животног века, и при томе да остане подобна за употребу та коју је намењена. Основни задатак инжењера је да конструкције буду пројектоване и изведене тако да са задовољавајућим степеном сигурности и економично испуњавају све захтеване услове. Конструкција са одговарајућем степеном сигурности мора да обезбеди:

- Сигурност – способност да прихвати сва оптерећења која ће се јавити током њеног века (контрола, носивост, стабилност)
- Функционалност – нормално функционисање објекта сходно намени (контрола деформација и вибрација)
- Трајност – да задржи сигурност и функционалност у прописаном року (корозија, замор материјала)

Конструкција прво треба да испуни све услове сигурности који су повезани са њеном носивости, односно способности да се одупре свим дејствима за које се очекују да ће се јавити током њене изградње и експлоатације.

Уколико критеријум сигурности, из било којег разлога није задовољен, долази до лома конструкције, односно до губитка стабилности целе конструкције. Конструкција мора да буде прорачуната тако да се одговарајућем степеном сигурности прихвати сва очекивана оптерећења која ће се јавити током њеног животног века.

Поред тога, да би одговорила свим захтевима који се односе на функционисање објекта као целине, или неког његовог дела конструкција треба да испуни све критеријуме функционалности, односно употребљивости који се од ње захтевају. Најчешће се односе на деформације које могу неповољно да утичу да саму удобност конструкције, функционисање опреме или да имају неповољан естетски ефекат. Такође и вибрације могу неповољно да утичу на саму функционалност конструкције.

На трајност конструкције, поред пројектовања, којим се обезбеђује правилан и квалитетан избор материјала, утичу и квалитет радова, услови средине и програм одржавања. Правилним обликовањем може се знатно повећати трајност конструкције са обзиром на корозиону заштиту, посебно код инжењерских облека. На крају треба истаћи да поред испуњавања ових услова, челичне конструкције морају да буду економичне и исплативе, односно конкурентне другим конструкцијама. Конструкција се може сматрати технички прихватљивом, односно поузданом, ако задовољава се услове у вези сигурности, функционалности и трајности.

Методе прорачуна помоћу којих се може доказати сигурност и функционалност конструкције деле се на детерминистичке и пробабилистичке. Методе прорачуна могу се поделити и према:

- теорији допуштених напона,
- теорији граничних стања,
- Европским стандардима за конструкције.

4.1 Прорачун према методи допуштених напона.

Метода допуштених напона једна је од најстаријих метода прорачуна, која је модификована током времена, и која још увек представља широко прихваћен концепт доказа сигурности челичних конструкција. Код ове методе постоје нека правила која се морају поштовати, а то су:

- Стандардом се дефинишу одређени случајеви оптерећења и одговарајући допуштени напони који не смеју бити прекорачени.
- Допуштени напони се одређују на основу јединствених коефицијента сигурност .

- Метода допуштених напона заснива се на Теорији еластичности и у погледу прорачуна утицаја у елементима конструкције (глобална анализа), и у погледу димензионисања пресека и елемента (локална анализа).
- Поред контроле напона потребна је и контрола деформација.

Метода допуштених напона се заснива на услову да услед спољашњег оптерећења, ни у једном пресеку конструкције, максимални нормални напон и смичући напон не смеју да буду већи од допуштених напона.

$$\sigma_{\max} < \sigma_{\text{dop}} = \frac{f_y}{\gamma}$$

$$\tau_{\max} < \tau_{\text{dop}} = \frac{f_y}{\gamma}$$

где су:

$\sigma_{\max}$ - максимални нормални напон,

σ_{dop} - допуштени нормални напон,

$\tau_{\max}$ - максимални смичући напон,

τ_{dop} - допуштени смичући напон,

f_y - напон на граници развлачења,

γ - коефицијент сигурности.

Суштина концепта допуштених напона је у ограничењу максималних напона који се услед реалних оптерећења јављају у елементима конструкције. Вредности допуштених напона, а самим тим и вредности степена сигурности су одређене (калибрисане) на основу дугогодишњег искуства у изградњи објеката на носећим конструкцијама. На овај начин конструкција је обезбеђена од лома, а еластично понашање њених елемената је осигурано за све време њеног трајања. При томе коефицијент сигурности обухвата све неправилности у вези процене оптерећења, карактеристика материјала, претпостављене и стварне геометрије конструкције, као и одступања стварних утицаја у конструкцији.

За различите елементе у конструкцији мередовне су различите комбинације оптерећења. Како су променљива оптерећења углавном независна и променљива кроз време, могуће је и њихово истовремено дејство. При комбиновању различитих оптерећења, сва оптерећења се узимају са пуним износом, али се за различите комбинације

прописује различит коефицијент сигурности. Дефинисани су три основна случаја оптерећења:

1. I случај - основно оптерећење,
2. II случај - основно плус допунско оптерећење,
3. III случај - основно, допунско и изузетно оптерећење.

Први случај оптерећења обухвата комбинације основних оптерећења, која се најчешће јављају током експлоатационог века конструкције, па је самим тим и коефицијент сигурности за овај случај највиши. У други случај оптерећења спадају комбинације оптерећења које поред основних обухватају и допунска оптерећења (ветар, бочни удари код кранских носача, силе кочења, температурски утицаји). Под трећим случајем оптерећења подразумевају се комбинације оптерећења које поменутих основних и допунских оптерећења обухватају и изузетна оптерећења, као што су сеизмика, силе удара возила.

За први случај оптерећења коефицијент сигурности износи 1,5, за други случај оптерећења износи 1,33, а за трећи случај оптерећења коефицијент сигурности је 1,2. Треба напоменути да за димензионисање различитих елемената једне исте конструкције могу да буду мередовни различити случајеви оптерећења.

Као што се може приметити, оптерећења су прописана законском регулативом и по комбинацијама и по интензитету. Методу прорачуна допуштених напона не карактеришу само детерминисана вредност оптерећења, комбинација оптерећења и коефицијента сигурности, већ и следеће претпоставке: елементи се рачунају са средњим напонима у пресецима, прорачуном се не обухватају заостала напонска стања, у прорачун се не уводе утицаји концентрације напона при девијацији тока силе.

У основна оптерећења убрајају се:

- сопствена тежина конструкције,
- стално оптерећење на њој,
- корисно оптерећење.

У допунска оптерећења убрајају се:

- утицаји инерцијалних сила,
- утицај ветра,
- утицај промене температуре,
- дејство снега,
- остала повремена оптерећења.

Имајући у виду да се челик до достизања границе развлачења понаша по Хуков закону као еластични материјал, достизање напона на граници развлачења означено је као почетак лома конструкције, односно као критеријум за њено димензионисање.

Приликом димензионисање конструкција неопходно је испунити низ захтева, а то су:

- Доказ напона,
- Доказ еластичне стабилности,
- Доказ деформације,
- Доказ сигурности веза,
- Доказ времена пригушења осциловања конструкције,
- Доказ напона у погледу јачине при замору материјала,
- Доказ динамичке стабилности,
- Доказ сигурности.

Доказ напона представља најзначајнији критеријум, којим се упоређује рачунско напонско стање конструкције са неким допуштеним напоном. Како се допуштени напон рачуна на основу резултата добијених на затезањем, потребно је неко сложено напонско стање у конструкције изразити преко замишљеног аксијалног напона, да би упоређивање било адекватно.

Доказ еластичне стабилности је појава везана за понашање елемента конструкције напрегнутих на притисак. Ако су елементи конструкције стабилни, онда је величина оптерећења толика да изазива њихову деформацију у границама неизменљивости карактера њихове улоге у конструкцији.

Испуњавање доказа деформација значи остваривање крутости конструкције, која остварује поуздан рад њених механизма, односно машине, обезбеђујући функционалност конструкције.

Доказ напона у погледу јачине при замору материјала представља дефинисање посебног допуштеног напона при замору који је функција допуштеног напона, и то посебно за основни материјал, посебно за елементе за везу.

Доказ сигурности веза подразумева да се веза оствари тако да целина конструкције у смислу преношења оптерећења не буде нарушена.

Доказ динамичке стабилности се врши код конструкција изложених периодично променљивом оптерећењу током времена. Формира се динамички модел конструкције па се његовим математичким описивањем одређује сопствени фреквентни спектар.

4.2 Прорачун према Теорији граничних стања.

Метода граничних стања која налази примену у савременим регулативама представља даје поједностављање поступка, у том смислу што су од свих параметара који утичу на прорачун само својства материјала и оптерећења одређени у статистичком смислу. Они се у прорачун уводе путем својих карактеристичних вредности. Остали фактори неизвесности обухватају трансформисањем карактеристичних вредности у прорачунске помоћу парцијалних степена сигурности. Уместо јединственог степена сигурности који се користи код теорије допуштених напона, метода граничних стања више парцијалних коефицијента сигурности који се односе на оптерећења и на отпорност. Гранично стање може да наступи у било ком тренутку коришћења, и представља стање у коме конструкција или неки део губи функцију. Постоје две основне групе граничних стања, а то су:

- гранична стања носивости и
- гранична стања употребљивости.

Гранична стања носивости су везана за рушење или неке друге видове губитка носивости конструкције. Најчешћи узроци настанка граничног стања носивости су:

- губитак статичке равнотеже,
- лом конструкције,
- прекомерне деформације и
- замор материјала.

У случају граничних стања лома или прекомерних деформација елемената и њихових веза доказ се може спровести на нивоу унутрашњих сила, или ређе на нивоу напона. Доказ граничних стања носивости на нивоу унутрашњих сила, може се одредити на следећи начин:

$$Sd < Rd \quad (4.1)$$

где су:

Sd – прорачунска вредност унутрашњих сила

Rd – одговарајућа прорачунска отпорност.

Прорачунска отпорност у случају челичних конструкција, може да се одради директно преко карактеристичних вредности својства материјала, као што су граница развлачења или чврстоћа затезања. При прорачуну челичних конструкција методом граничних стања потребно је да се спроведе анализа понашања конструкције у односу на сва критична гранична стања. Уобичајено је да се конструкција димензионише у односу

на гранично стање носивости, а проверава на гранично стање употребљивости. Гранична стања употребљивости односе се на функционалност објекта. Најчешћи критеријуми су :

- деформације конструкција или њених делова,
- вибрације и
- напони.

Контрола граничних стања употребљивости може се одредити на основу израза:

$$Ed < Cd \quad (4.2)$$

где су:

Ed – одговарајући прорачунски утицај од дејства, који је одређен на основу једне од комбинација дејстава за гранична стања употребљивости.

Cd – номинална вредност или функција одређених прорачунских својстава материјала (допуштени угиб)

Као што се може приметити, при контроли граничних стања употребљивости не могу се користити комбинације дејства које се примењују за гранична стања носивости. [4]

4.3 Прорачун према Европским стандардима за конструкције.

Еврокодови представљају фамилију европских стандарда за прорачун конструкција, којима су обухваћена дејства на конструкције, као и прорачун конструкције од различитих материјала. Према садржини подељени су на десет делова:

- Еврокод 0 (SRPS EN 1990): Основе пројектовања конструкција
- Еврокод 1 (SRPS EN 1991): Дејства на конструкције
- Еврокод 2 (SRPS EN 1992): Пројектовање бетонских конструкција
- Еврокод 3 (SRPS EN 1993): Пројектовање челичних конструкција
- Еврокод 4 (SRPS EN 1994): Пројектовање спрегнутих конструкција од челика и бетона
- Еврокод 5 (SRPS EN 1995): Пројектовање дрвених конструкција
- Еврокод 6 (SRPS EN 1996): Пројектовање зиданих конструкција
- Еврокод 7 (SRPS EN 1997): Геотехничко пројектовање
- Еврокод 8 (SRPS EN 1998): Пројектовање сеизмички отпорних конструкција
- Еврокод 9 (SRPS EN 1999): Пројектовање алуминијумских конструкција

Како се може уочити, подела је извршена према врстама материјала, док су два Еврокода општа (Еврокод 1 и Еврокод 2) и односе се на основе прорачуна и оптерећења. Сви Еврокодovi су конципирани тако да садрже више посебних делова који обрађују специфичну проблематику везану за одређени тип конструкције. Еврокод 3, који се бави проблематиком челичних конструкција, подељен је на следеће делове:

- Део 1-1: Општа правила и правила за прорачун,
- Део 1-2: Прорачун конструкција за дејство пожара,
- Део 1-3: Додатна правила за хладно обликоване танкозидне елементе и лимове,
- Део 1-4: Нерђајући челици,
- Део 2: Мостови и лимене конструкције,
- Део 3: Торњеви, јарболи димњаци,
- Део 4: Резервоари, силоси и цевоводи,
- Део 5: Шипови
- Део 6: Конструкције за диталице,
- Део 7: Конструкција у мору и приобаљу и
- Део 8: Конструкција за специјалну намену.

Најобимнији од свих ових делова је Део 1-1, који даје општа правила и основне принципе прорачуна, као и посебна правила за уобичајне конструкције. Остали делови само допуњују или коригују Део 1-1, како би се обухватиле специфичности одређене врсте конструкција. Због специфичности прорачуна и значајног обима делови 1-2 и 1-3, који су такође општег карактера, третирају се као посебни документи. [2]

Део 1-1 садржи девет поглавља са следећим насловима:

- Поглавље 1 Увод,
- Поглавље 2 Основе прорачуна,
- Поглавље 3 Материјали,
- Поглавље 4 Гранична стања употребљивости,
- Поглавље 5 Гранична стања носивости,
- Поглавље 6 Везе под оптерећењем,
- Поглавље 7 Израда и монтажа,
- Поглавље 8 Прорачун,
- Поглавље 9 Замор.

Постоје 4 класе попречних пресека према Еврокоду 3:

1. Попречни пресеци који могу да достигну момент пластичне носивости, и образују пластичан зглоб са захтеваним капацитетом ротације за глобалну пластичну анализу.

2. Попречни пресеци који могу да достигну момент пластичненосивости, али имају ограничен капацитет ротације.
3. Попречни пресеци код којих напон у најудаљенијем притиснутом влакну (при еластичној расподели напона) може да достигне границу развлачења, али избочавање спречава развој пуног момента пластичне носивости.
4. Попречни пресеци код којих се избочавање јавља предостизања границе развлачења у једном или више делова поперечног пресека.

Као и сви савремени прописи за прорачун конструкције и Еврокод се заснива на полупробабилистичком концепту прорачуна, а поузданост конструкције се доказује на основу методе парцијалних коефицијената. Посебно треба истаћи да Еврокод пружа разне могућности инжењерима-пројектантима да у потпуности искористе еласто-пластична својства челика као материјала и прецизно утврде носивост поперечних пресека или елемената. Понашање конструкција се више не ограничава само на еластичну област, већ се анализира њено понашање све до достизања граничног стања носивости.

Еврокод дефинише различите прорачунске ситуације које треба да обухвате све околности у којима се сама конструкција може наћи. Под тим околностима подразумевају се различите диспозиције и комбинације дејстава, односно оптерећења која се могу очекивати. Еврокод разликује четири групе прорачунских ситуација:

- сталне прорачунске ситуације,
- повремене или пролазне прорачунске ситуације,
- инцидентне прорачунске ситуације и
- сеизмичке прорачунске ситуације.

Сталне прорачунске ситуације обухватају уобичајне, нормалне услове коришћења објекта и одговарајућа дејства која се јављају.

Повремене или пролазне прорачунске ситуације односе се на повремене ситуације које настају приликом извођења или поправке.

Инцидентне прорачунске ситуације обухватају случајеве који се јављају током експлоатационог века конструкције, а у које спадају пожар, експлозија.

Сеизмичке прорачунске ситуације односе се на сеизмичка дејства, односно на утицаје који се јављају у конструкцији током земљотреса.

У оквиру Еврокода прецизно је дефинисан начин означавања врста и квалитета челика који се примењују за конструкције, као и њихове најважније механичке и физичке карактеристике. Сваки челик има основну ознаку којом се дефинише његова врста. Fe је заједнички симбол за све челике, а затим следи троцифрени број који одговара номиналној чврстоћи челика на затезање. Поред основних ознака постоје и додатне ознаке којима се

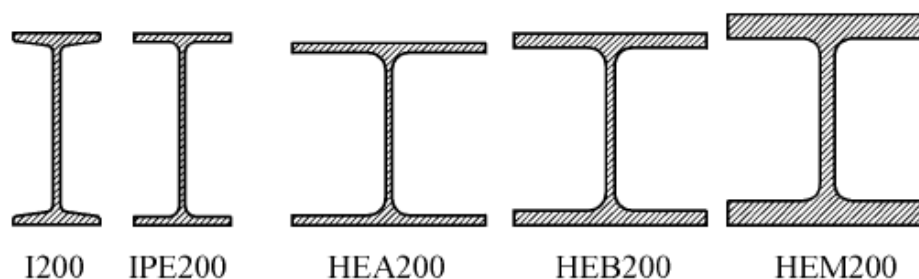
одређује квалитет челика. Вредности основних механичких карактеристика за поједине врсте челика у складу са еврокодом приказане су у табели 4.1

Табела 4.1 Номиналне вредности границе развлачења и чврстоће на затезање за конструкциони челик

Означавање врсте челика		Дебљина t			
		$t < 40\text{mm}$		$40 < t < 100\text{ mm}$	
Еврокод	EN 10027-1	f_y	f_u	f_y	f_u
Fe 360	S235	235	360	215	340
Fe 430	S275	275	430	255	410
Fe 510	S355	355	510	335	490

5. Димензионисање танкозидних носача

Под носачем се подразумева конструктивни елемент који под дејством оптерећења подлеже претежно деформацијама савијања. Носачи се изводе на два начина, као пуни носачи и решеткасти. Као пуни носачи стандардни ваљани профили и профили образовани спајањем равних челичних лимова помоћу угаоника и закивака. Предност ваљаних у односу на пуне лимене носаче огледа се пре свега у минимализацији радионичких захвата, па самим тим и трошкова. Од широке палете ваљаних профила најчешће се као носачи користе I профили са уским или широким ножицама, слика 5.1



Слика 5.1 Различити типови профила који се користе као носачи [8]

Профили I и IPE су профили са уским ножицама, а профили са широким ножицама су HEA, HEB и HEM.

Употреба I профила са уским ножицама је рационална када је носач изложен само савијању око јаче осе инерције. Предност оваквих носача у односу на остале профиле је у

мањој тежини, а недостатак је велика конструктивна висина и релативно мала отпорност на савијање око слабије осе инерције, па самим тим и на бочно торзионо савијање.

Примена ваљаних I профила са широким ножицама препоручен је када је носач изложен косом савијању, затим када носач није бочно придржан. У поређењу са I профилима са уским ножицама ови профили захтевају мању конструктивну висину, али могу да буду знатно тежи. Осим тога I профили са широким ножицама имају већу носивост од профила са уским ножицама, па се примењују и у случајевима када распон и оптерећење носача диктирају носивост већу од оне коју поседују профили. [5]

Већа тежина пуних носача долази отуда што поједини делови попречног пресека нису напрегнути до допуштеног напона; ово међутим није случај са решеткастим носачима код којих је сваки штап у целом пресеку потпуно искоришћен, ако се занемаре секундарни напони. С друге стране пуни носачи због ове чињенице имају у себи већу сигурност и мање су осетљиви на евентуално прекорачење рачунских оптерећења, пошто је пластичношћу челика омогућена адаптација напона у пресеку.

Приликом самог димензионисања носача потребно је спровести одређене контроле, а то су:

1. Контрола напона,
2. Контрола деформација,
3. Контрола стабилности на бочно-торзијско извијање и
4. Контрола стабилности на избочавање.

5.1 Контрола напона

Нормални напон изазван дејством момента савијања линеарно се мења по висини попречног пресека. Максималне вредности нормалних и смичућих напона морају бити мање од допуштених, па се контрола напона одређује се на основу израза:

$$\sigma_x = \frac{M_y}{I_y} < \sigma_{dop} \quad (5.1)$$

$$\tau_{xz} = \frac{V \cdot S_y}{I_y \cdot t_w} \approx \frac{T}{A} < \tau_{dop} \quad (5.2)$$

где су:

S_y – статички момент за тежиште пресека око у-у осе,

I_y – момент инерције у-у осе,

V – трансверзална сила,

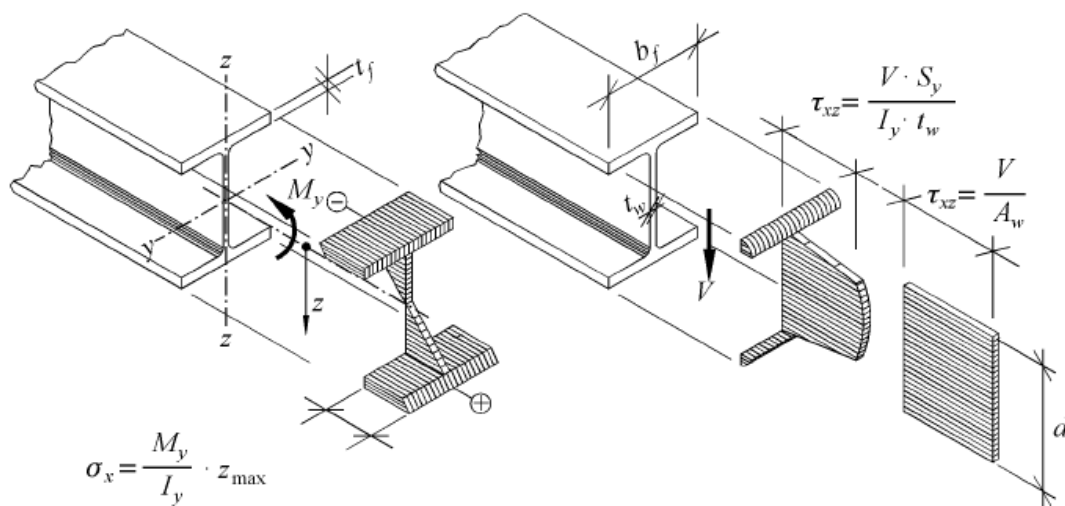
A – површина ребра,

t_w – дебелина ребра.

На тај начин конструкција је обезбеђена од лома, а еластично понашање њених елемената је осигурано за време њеног трајања. Методе допуштених напона не допушта никакву редукцију свих оптерећења при истом деловању, којом би се на изврстан начин узела у обзир смањена вероватноћа истовременог дејства више различитих променљивих оптерећења. [2]

Како се у оквиру попречног пресека момент инерције I_y и трансверзална сила V константни, облик напонског дијаграма зависи од статичког момента S_y и ширини пресека. Ширина пресека се у зони мења скоковито. У зони појасева једнака је њиховој ширини, а дуж ребра једнака је дебелини ребра.

Пуни лимени носачи су изложени дејству спољашњих сила које проузрокују савијање, па се у попречним пресецима осим момента савијања јављају и трансверзалне силе. Распоред напона у оквиру попречног пресека, а у домену еластичног напрезања приказан је на слици 5.2



Слика 5.2 Дијаграм напона код I носача оптерећеног моментом и трансверзалном силом [3]

У укљештењу конзолних носача, као и у пресецима на унутрашњим ослоњцима континуалних носача и момент и трансверзална сила у истом пресеку достижу максималне вредности, па је потребно осим контроле нормалних напона, неопходна и контрола упоредних напона. Контрола упоредних напона неопходна је и код носача који су оптерећени покретним оптерећењем.

Контрола упоредних напона може да се изврши на основу Мизесовог услова пластификације, према изразу:

$$\sigma u = \sqrt{\sigma^2 x1 + 3 \cdot \tau^2 x s1} < \sigma dop \quad (5.3)$$

где су:

σ_{x1} - нормални напон,

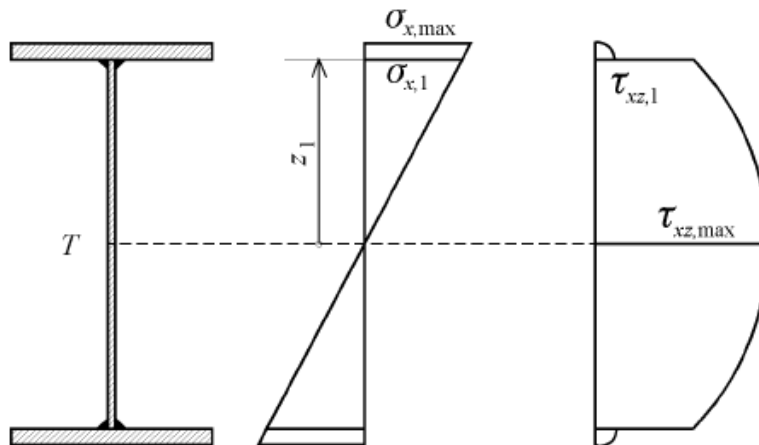
τ_{xs1} - смичући напони.

Нормални и смичући напони одређују се на основу израза:

$$\sigma x = \frac{My}{Iy} \quad (5.4)$$

$$\tau xz = \frac{V \cdot Sy}{Iy \cdot tw} \quad (5.5)$$

Интеракција нормалних и смичућих напона приказана је на слици 5.3



Слика 5.3 Интеракција нормалних и смичућих напона-упоредни напон [3]

5.2 Контрола деформација

Да би носачи могли да одговоре свим пројектним захтевима, потребно је да деформације буду мање од допуштених. Контрола деформација одређује се на основу израза:

$$\delta max < \delta dop = \frac{l}{m} \quad (5.6)$$

где су:

δmax — максимални угиб,

δdop — допуштена вредност угиба,

Вредност параметра l зависи од :

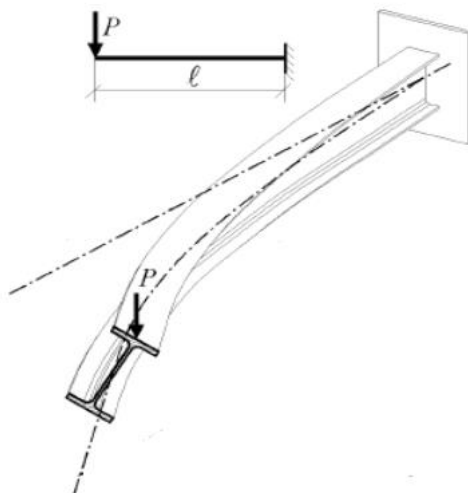
- Типа носача и
- Врсте неконструктивних елемента који се ослањају на носач.

Тип конструкције, место носача у конструкцији, као и његова намена и евентуално технички услови које је неопходно обезбедити ради несметаног функционисања машина или уређаја условљавају вредности допуштених угиба.

5.3 Контрола стабилности на бочно торзијско извијање.

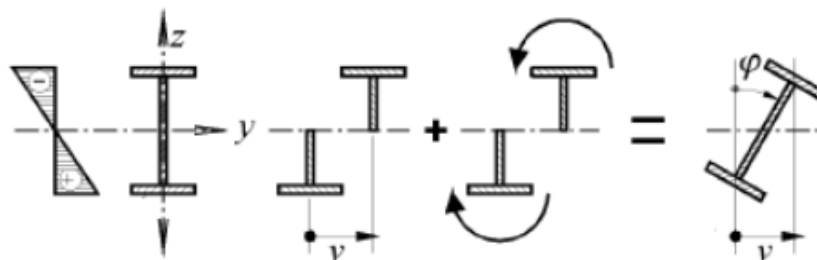
Пуни лимени носачи су најчешће изложени дејству спољашњих сила које изазивају савијање око јаче осе инерције. Због тога се као пуни носачи углавном користе I пресеци, код којих је крутост на савијање око јаче осе знатно већа од крутости савијања око слабије осе. Носачи I пресека спадају у танкозидне носаче отвореног пресека, па је њихова торзиона крутост веома мала. Пошто је торзиона крутост веома мала овакви носачи су осетљиви на бочна померања и ротацију око центра смицања.

Ако се посматра конзолни носач оптерећен на савијање око јаче осе инерције, може се уочити да услед оптерећења малог интензитета долази до померања носача само у равни оптерећења, слика 5.4. [2]



Слика 5.4 Померања носача у равни оптерећења [3]

Пошто се носачи монолитни притиснута половина носача не може самостално да се извије управно на слабију осу инерције. Преостала затегнута половина пресека спречава његово слободно извијање, па долази и до ротације попречног пресека, слика 5.5.



Слика 5.5 Ротација попречног пресека [5]

Проблем бочног торзионог извијања први је одрадио Тимошенко, који је уједно и успоставио теорију линеарно еластичног бочно торзионог савијања. Проблем бочно торзионог извијања, може се на неки начин поистоветити са извијањем притиснутог дела носача управно на раван носача. При прорачуну критичног оптерећења, услед којег долази до бочног торзионог извијања уводе се следеће претпоставке:

- материјал је идеално еластичан,
- носач је идеално прав,
- спречена је торзија ротације ослонаца,
- попречни пресек задржава свој облик након деформације,
- попречни пресек је обострано симетричан и константан дуж целог носача.

Проблем торзије носача може да се опише следећом диференцијалном једначином:

$$M_t = M_y \cdot \frac{dv}{dx} = G I_t \cdot \frac{dv}{dx} - E I_w \frac{d^3 v}{dx^3} \quad (5.8)$$

где су:

I_t – торзиони момент инерције попречног пресека,

I_w – секторски момент инерције попречног пресека,

E – модул еластичности и

G – момент клизања.

Ова диференцијална једначина дефинише проблем сложене торзије. Први члан са десне стране једначине описује обичну Сан Венанову торзију, а други описује проблем спречене торзије.

5.4 Комбиновања напрезања

5.4.1 Савијање и смицање

Када се у једном попречном пресеку истовремено јављају и момент савијања и смичућа сила, треба да се испита утицај њихове интеракције. Овакав случај често је присутан код елемената оптерећених на савијање. Примена фон Мизесофог упоредног напона као критеријум исцрпљења носивости попречног пресека дефинише достизање границе развлачења у његовом најоптерећенијем делу, углавном у ребру и пресека непосредно испред ножице. Као карактеристични примери, када ова контрола треба да се спроведе, могу се навести попречни пресеци укљештења код конзолних носача и други слични случајеви код којих се у истом пресеку јављају максимални момент савијања и смичућа сила.

До потпуног искоришћења попречног пресека, односно достизања граничног стања носивости у највећем броју случајева долази тек при његовој пластификацији. Према Еврокоду 3 код пресека класе 1 и 2 код којих се може применити пластична анализа носивости попречног пресека, у случају интеракције савијања и смицања, поред напрезања неопходно је да се изврши и контрола интерактивног дејства и то на следећи начин:

$$\frac{M_{ed}}{M_{v,rd}} < 1 \quad (5.9)$$

где су:

M_{ed} – прорачунска вредности момента савијања око у-у или z-z осе,

$M_{v,rd}$ – прорачунска вредност редукованог момента пластичне носивости.

Утицај смицања на смањење момента пластичне носивости не треба да се узме у обзир када је прорачунска вредност силе смицања V_{ed} мања од 50% пластичне носивости попречног пресека на смицање $V_{pl,Rd}$, односно када је:

$$V_{ed} < 0,5 V_{pl,Rd} \quad (5.10)$$

5.4.2 Савијање и аксијална сила

За разлику од интеракције савијања и смицања која ретко резултира редукијом момента носивости, интеракција момента савијања и аксијалне силе често доводи до смањења момента носивости попречног пресека. Потребно је показати, поред појединачних провера носивости на аксијално напрезање и савијања, да је задовољен у следећи услов:

$$\frac{M_{ed}}{M_{n,rd}} < 1 \quad (5.10)$$

Дијаграм нормалног напона услед дејства момента савијање и аксијалне силе може да се разложи на део који почиње од момента савијања и део уз тежиште пресека.

За стандардне профиле Еврокод 3 дефинише критеријуме када није потребно контролисати интеракцију савијања и аксијалног напрезања, односно када је утицај аксијалне силе занемарљив. У случају савијања око у-у осе није потребна никаква редукција момента пластичне носивости уколико је прорачунска вредности аксијалне силе мања од четвртине носивости попречног пресека и половина пластичне носивости ребра, односно ако су задовољена оба следећа услова:

$$N_{ed} < 0,25N_{pl,Rd} \quad (5.11)$$

$$N_{ed} < \frac{0,5h_w \cdot t_w \cdot f_y}{\gamma_{mo}} \quad (5.12)$$

где је:

h_w — висина ребра,

t_w — дебљина ребра.

У случају савијања око z-z осе, критеријум је још блажи будући да је допринос ребра момента носивости око слабије осе јако мала, па се редукција момента носивости може занемарити када је прорачунска вредност аксијалне силе мања од носивости читавог ребра на дејство аксијалне силе, односно када је:

$$N_{ed} < \frac{h_w \cdot t_w \cdot f_y}{\gamma_{mo}} \quad (5.13)$$

5.4.3 Косо савијање

У случају косог савијања, односно истовременог дејства момента савијања око обе осе, у зависности од класе пресека такође могу да се користе пластична или еластична анализа носивости попречног пресека.

За одређивање секторских координата датог попречног пресека бирају се тачке на местима на којима се очекује промена вредности секторских координата. Еврокод 3 не даје изразе за контролу носивости попречних пресека на комбиновано дејство момента

савијања, али се по аналогiji могу користити изрази за случај интеракције момената савијања и аксијалне силе:

$$\sigma_{x,Ed} = \frac{M_{y,ed}}{W_{y,min}} + \frac{M_{z,ed}}{W_{z,min}} < \frac{f_y}{\gamma_{mo}} \quad (5.14)$$

Пластична анализа носивости попречног пресека заснива се на дијаграму нормлних напона при потпуној пластификацији. Код I и H пресека који се најчешће користе у челичним конструкцијама делови ножица прихватају момент савијања око z-z осе, док се ребро пресека и преостали унутрашњи делови ножица супростављају моменту савијања око y-y осе

5.4.4 Савијање, смичање и аксијална сила

У случају истовременог дејства аксијалне силе, смичуће силе и момента савијања носивост попречног пресека може да се провери применом фон Мизесовог услова пластификације.

Код попречних пресека класе 1 и 2 код којих се примењује пластична анализа носивости интеракција аксијалне силе, смичуће силе и момента савијања се проверава применом концепта редукованог момента пластичности. Ако је интензитет смичуће силе такав да се захтева редукација момента пластичне носивости, и ако прорачунска вредност аксијалне силе не испуњава услов, прорачунска вредност момента носивости треба да се одреди као у случају комбинације савијања и аксијалног напрезања. Поступак одређивања момента носивости зависи од тога да ли је површина попречног пресека где делује аксијална сила већа или мања од површине ребра.

Површина попречног пресека за пријем аксијалне силе одређује се на основу израза:

$$A_n = \frac{N_{ed}}{(1 - \rho) \cdot f_y} \quad (5.15)$$

где су:

N_{ed} — аксијална сила,

ρ — коефицијент којим се узима утицај смичућег напона,

f_y — граница развлачења

5.4.5 Смицање и торзија

Када се у попречном пресеку истовремено јављају утицај смицања и торзије, према Еврокоду 3 контрола носивости попречног пресека на интеракцију смицања и торзије, спроводи се на следећи начин:

$$\frac{V_{ed}}{V_{pl,t,rd}} < 1 \quad (5.16)$$

где је:

$V_{pl,t,rd}$ – редукована пластична носивост попречног пресека на смицање која зависи од врсте и интензитета торзионог утицаја.

При еластичној анализи носивости попречног пресека на комбиновано дејства смицања и торзије неопходно је да се изврши контрола смичућег напона:

$$\tau = \tau_{vz,ed} + \tau_{vy,ed} + \tau_{t,ed} + \tau_{w,ed} < \frac{\frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{mo}} \quad (5.17)$$

где су:

$\tau_{vz,ed}$ – смичући напон услед смичуће силе која делује у правцу z-z осе,

$\tau_{vy,ed}$ – смичући напон услед смичуће силе која делује у правцу у-у осе,

$\tau_{t,ed}$ – смичући напон услед момента униформне тозије,

$\tau_{w,ed}$ – смичући напон услед момента неуниформне тозије.

При одређивању тоталног максималног смичућег напона, треба водити рачуна о томе које од наведених компонената смичућих напона постоје и да ли могу деловати у истој тачки попречног пресека

5.4.6 Савијање, смицање и торзија

Када је попречни пресек оптерећен смичућом силом, моментом торзије и моментом савијања, редуковани момент пластичне носивости попречног пресека може се одредити као и у случају интеракције савијања и смицања. Код попречног пресека поред контроле смичућег напон, који се одређује као код смицања и торзије, потребно је одредити и контролу нормалних напона:

$$\sigma = \sigma_{N,ed} + \sigma_{M_y,ed} + \sigma_{M_z,ed} + \sigma_{w,ed} < \frac{f_y}{\gamma_{mo}} \quad (5.18)$$

$\sigma_{N,ed}$ – нормални напон услед аксијане силе,

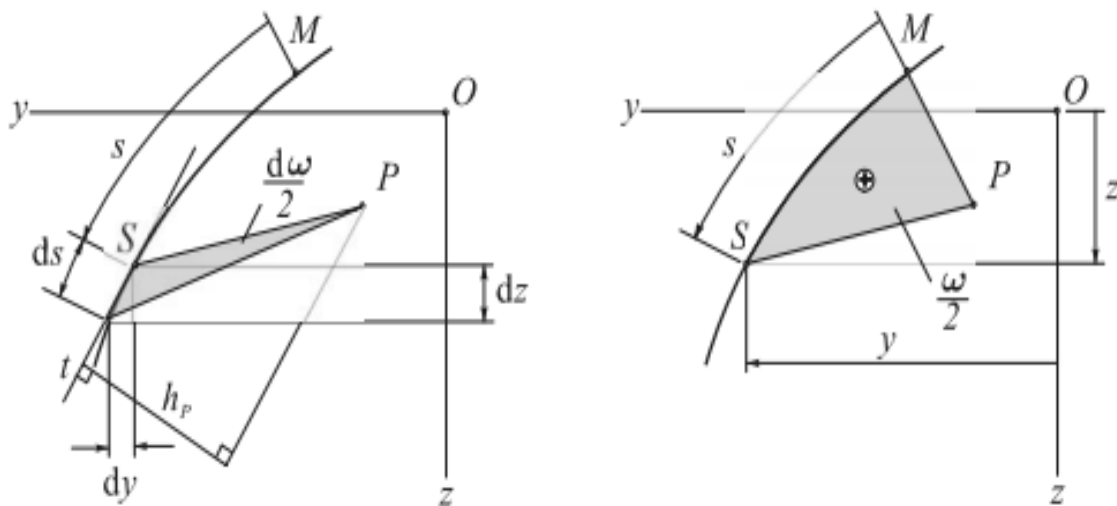
$\sigma_{M_y,ed}$ – нормални напон услед момента савијања око у-у осе,

$\sigma_{M_z,ed}$ – нормални напон услед момента савијања око z-z осе,

$\sigma_{w,ed}$ – нормални напон услед бимоента.

5.5 Секторске карактеристике и начин одређивања

Положаје тачке S одређен је координатама S(x,y,z), положај тачке S може се одредити помоћу секторске координате ω : S(x, ω), која је одређена на основу тачке M и пола P, слика 5.6.



Слика 5.7 Секторска координата

Секторска координата једнака је двострукој површини коју описује вектор PS, из пола P, од тачке M до тачке S:

$$\omega = \int h_P \cdot ds \quad (5.19)$$

$$d\omega = h_P \cdot ds \quad (5.20)$$

Секторска координата се наноси у правцу управном на тангенту. Она је позитивна ако расте у смеру супротном од смера казаљке на сату, а негативна ако расте у смеру казаљке на сату.

Основне секторске карактеристике попречног пресека су:

- секторска координата:

$$\omega = \int \omega \cdot dA, \quad (5.21)$$

- секторски статистички момент површине:

$$S\omega = \int \omega \cdot dA (= \delta \int \omega \cdot ds), \quad (5.22)$$

- секторски центрифугални моменти:

$$I_x\omega = \int x \cdot \omega \cdot dA (= \delta \int x \cdot \omega \cdot ds), I_y\omega = \int y \cdot \omega \cdot dA (= \delta \int y \cdot \omega \cdot ds), \quad (5.23)$$

- секторски центрифугални моменти инерције:

$$I\omega = \int \omega^2 \cdot dA (= \delta \int \omega^2 \cdot ds), \quad (5.24)$$

где су:

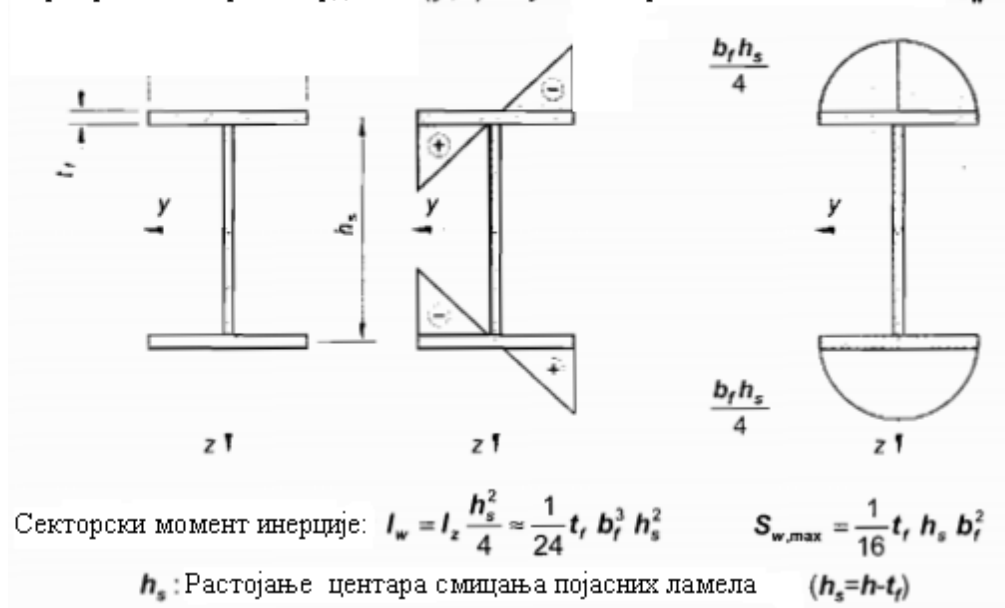
ω – секторска координата,

A – површина попречног пресека (dA – елемент површине),

δ – дебљина попречног пресека.

За прорачун секторских карактеристика попречног пресека користе се графички метод (премножавање дијаграма). На пример $I_x\omega$ се добија премножавање дијаграма промене координате x у попречном пресеку и дијаграма промене секторске координате ω дуж попречног пресека. На слици 5.7 је приказан дијаграми секторске координате $\omega(s)$ и секторског статичког момента $S\omega(s)$ за I профил.

Нормирана секторка координата $(y, z) = -yz$ Секторски статички момент S_w



Слика 5.7 Дијаграми секторске координате $\omega(s)$ и секторског статичког момента $S_\omega(s)$ за I профил. [3]

За пример коју се налази на слици премножава се троугао пута троугао, слика 5.7 и користи се образац:

$$I_{ab} = \frac{A_{ab}}{3} \cdot \eta b \cdot \eta b$$

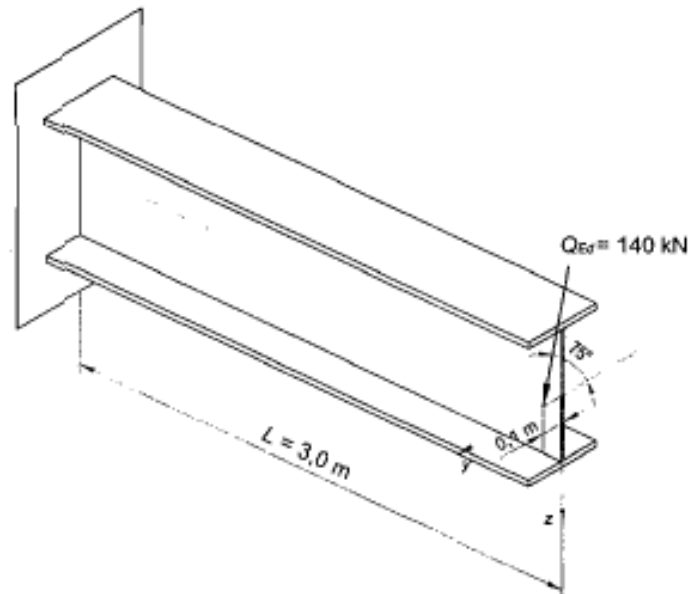
$$A_{ab} = \frac{1}{2} \cdot \frac{a}{2} \cdot \frac{a}{2}$$

$$\eta b = \frac{a}{2}$$

Да би се одредили центрифугални моменти инерције, потребно је урадити дијаграм промене координате y по пресеку. Затим се премножавањем овог дијаграма дијаграмом секторске координате добијају вредности центрифугалних момената инерције на појединим местима датог попречног пресека. Сабирањем ових вредности добија се тражена вредност центрифугалног момента инерције за наш попречни пресек.

6. Пример прорачуна танкозидног носача

Конзолни носач распона 3 m оптерећен је концентрисаном силом $Q_{ED} = 140 \text{ kN}$ која делује на слободна крају, под углом од 75° и ексцентрично у односу на осу конзолног носача $e = 0,1 \text{ m}$, слика 6.1. За конзолни носач усвојен је профил НЕВ 500. Потребно је да све неопходне контроле носивости попречног пресека услед сложеног оптерећења. Основни материјал је челик S355.



Слика 6.1 Конзолни носач

Геометријске карактеристике попречног пресека:

$$h = 500 \text{ mm}$$

$$b = 300 \text{ mm}$$

$$t_w = 14,5 \text{ mm}$$

$$t_f = 28 \text{ mm}$$

$$r = 27 \text{ mm}$$

$$A = 23860 \text{ mm}^2$$

$$W_{el,y} = 4287 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$W_{pl,y} = 3949 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$W_{el,z} = 841,6 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$I_y = 131500 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

$$I_t = 538,4 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

$$I_w = 7018 \cdot 10^9 \text{ mm}^6$$

Прорачунске вредности сила и момената у укљештењу $x = 0$.

$$V_{z,Ed} = Q_{Ed} \sin \alpha = 135,2 \text{ kN}$$

$$V_{y,Ed} = Q_{Ed} \cos \alpha = 36,2 \text{ kN}$$

$$M_{y,Ed} = V_{z,Ed} \cdot L = 135,2 \cdot 3 = 405,6 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Ed} = V_{y,Ed} \cdot L = 36,2 \cdot 3 = 108,6 \text{ kNm}$$

$$T_{Ed} = V_{z,Ed} \cdot e = 135,2 \cdot 0,1 = 13,52 \text{ kNm}$$

$$k = L \sqrt{\frac{GI_t}{EI_w}} = 3000 \cdot \sqrt{\frac{81000 \cdot 538,4 \cdot 10^4}{210000 \cdot 7018 \cdot 10^9}} = 1,632$$

$$B_{ed} = \frac{T_{ed} \cdot L}{k} \cdot \left(\operatorname{shk} \frac{x}{L} - \operatorname{thk} \operatorname{chk} \frac{x}{L} \right) = \frac{13,52 \cdot 3}{1,632} \cdot (0 - \operatorname{th} 1,632 \cdot 1) = -23,03 \text{ kNm}^2$$

$$T_{w,ed} = T_{ed} \cdot \left(\operatorname{chk} \frac{x}{L} - \operatorname{thk} \operatorname{shk} \frac{x}{L} \right) = 13,52 \cdot (1 - 0) = 13,52 \text{ kNm}^2$$

$$T_{t,ed} = T_{ed} - T_{w,ed} = 0$$

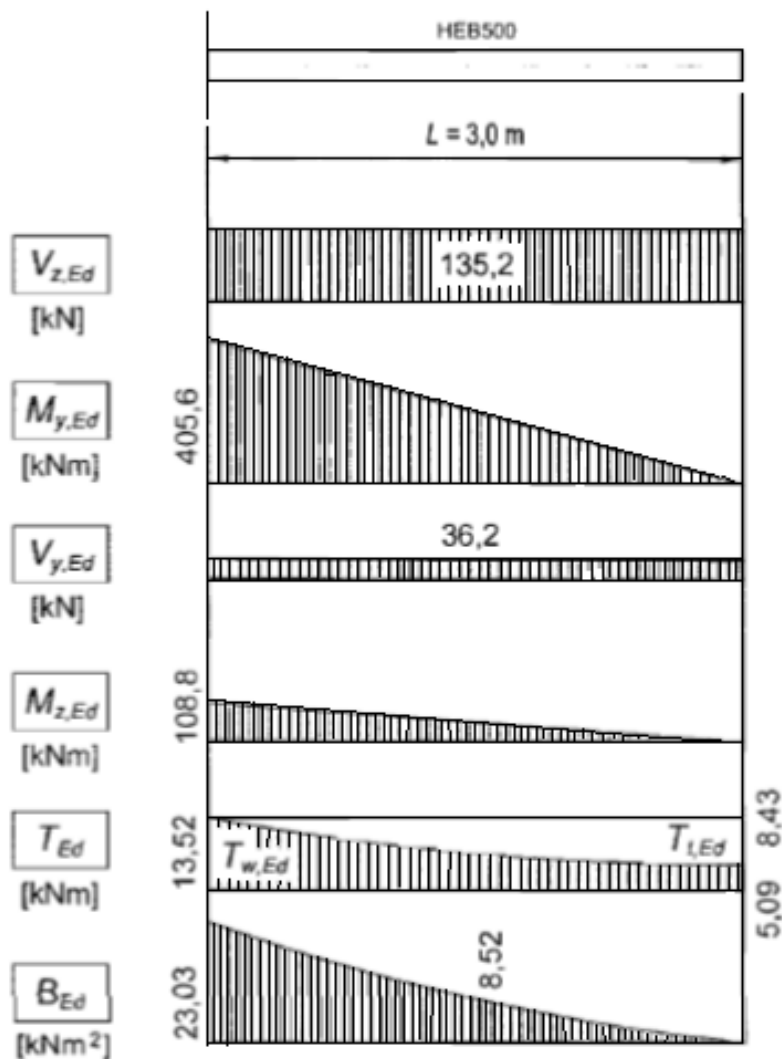
Контрола напона

$$h_s = h - t_f = 500 - 28 = 472 \text{ mm}$$

$$S_{w,max} = \frac{1}{16} \cdot t_f \cdot h_s \cdot b^2 = \frac{1}{16} \cdot 28 \cdot 472 \cdot 300^2 = 7434 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

$$w(y,z)_{max} = \frac{b \cdot h_s}{4} = \frac{300 \cdot 472}{4} = 35400 \text{ mm}^2$$

На слици 6.2 приказани су дијаграми статичких утицаја у конзолном елементу.



Слика 6.2 Дијаграми статичких утицаја у конзолном елементу

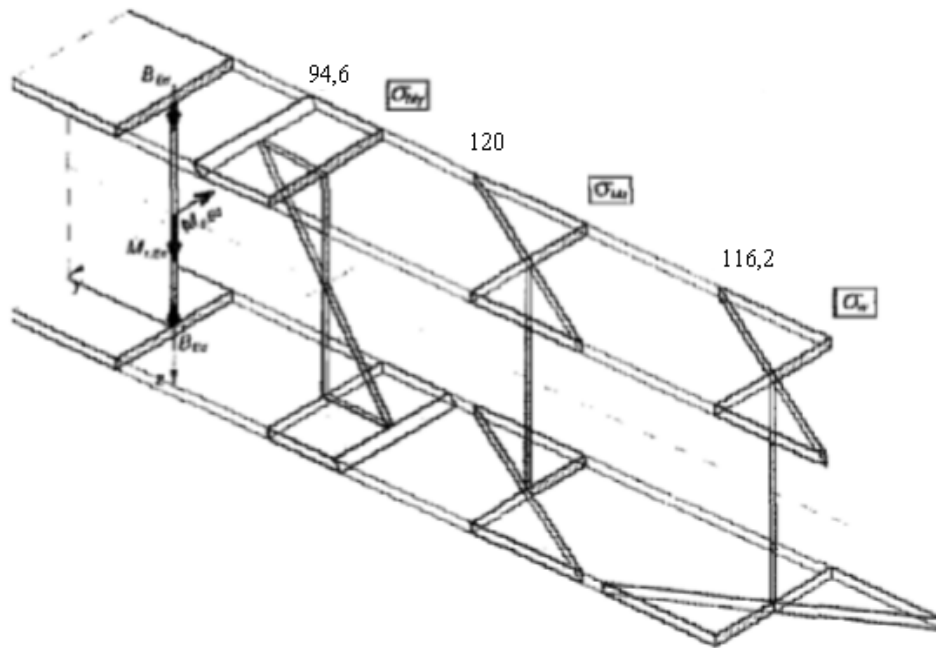
Нормални напон

$$\sigma_{M_y, ed} = \frac{M_{y, ed}}{W_{y, ed}} = \frac{405,6 \cdot 10^6}{4287 \cdot 10^3} = 94,6 \text{ N/m}^2$$

$$\sigma_{M_z, ed} = \frac{M_{z, ed}}{W_{z, ed}} = \frac{108,6 \cdot 10^6}{841,6 \cdot 10^3} = 120 \text{ N/m}^2$$

$$\sigma_{w, ed} = \frac{B_{ed}}{I_w} \cdot w(y, z) = \frac{23,03 \cdot 10^9}{7018 \cdot 10^9} \cdot 35400 = 116,2 \text{ N/m}^2$$

$$\sigma_{tot,ed} = \sigma_{My,ed} + \sigma_{Mz,ed} + \sigma_{w,ed} = 339,8 < 355 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$



Слика 6.3 Дијаграми нормалних напона у укљештењу

Смичући напони ($\tau_{yd} = \frac{fy\sqrt{3}}{\gamma_{m0}} = 205 \text{ N/m}^2$)

$$\tau_{w,ed} = \frac{T_{w,ed} \cdot S_{w,max}}{t_w \cdot t_f} \approx \frac{3}{2} \frac{T_{w,ed}}{b \cdot t_f \cdot h_s} = \frac{3}{2} \cdot \frac{13,52 \cdot 10^6}{300 \cdot 28 \cdot 472} = 5,1 \text{ N/m}^2$$

$$\tau_{vz,ed} = \frac{V_{z,ed} \cdot S_{y,max}}{I_y \cdot t_w} = \frac{13,52 \cdot 10^3 \cdot 4815 \cdot 10^3}{131500 \cdot 10^4 \cdot 14,5} = 17,1 \text{ N/m}^2$$

$$\tau_{vy,ed} = \frac{3}{2} \frac{V_{y,ed}}{b \cdot t_f} = \frac{3}{2} \cdot \frac{36,2 \cdot 10^3}{300 \cdot 28} = 3,2 \text{ N/m}^2$$

У ножицама

$$\tau_{tot,ed} = \tau_{vy,ed} + \tau_{w,ed} = 3,2 + 5,1 = 8,3 \text{ N/m}^2$$

У ребру

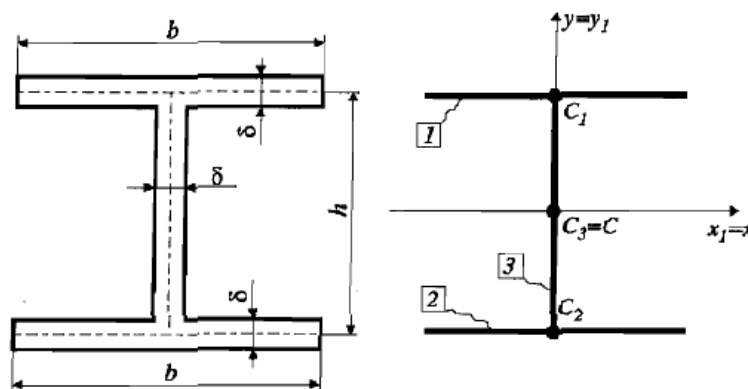
$$\tau_{tot,ed} = \tau_{vz,ed} = 17,1 \text{ N/m}^2$$

Упоредни напон:

Како су смичући напони малог интензитета, контрола упоредног напона за овај пример није меродавна.

6.1 Одређивање секторских карактеристика

На слици 6.4 приказан је попречни пресек и почетни координатни систем I профила.



Слика 6.4 Попречни пресек и почетни координатни систем I профила.

- Површина

$$A_1 = A_2 = \delta \cdot b = 2,8 \cdot 30 = 84 \text{ cm}^2$$

$$A_3 = \delta \cdot h = 1,45 \cdot 50 = 72,5 \text{ cm}^2$$

$$A = A_1 + A_2 + A_3 = 240,5 \text{ cm}^2$$

Напомена: Дебљина ребра је 14,5см и није иста као стопица.

- Тежиште

$$X_c = 0$$

$$Y_c = 0$$

- Момент инерције

$$I_y = I_{y1} + I_{y2} + I_{y3}$$

Центар смицања

$$X_D = X_Q + \frac{I_{ywQ}}{I_x} = 0$$

$$Y_D = Y_Q - \frac{I_{xwQ}}{I_y} = 0$$

За одређивање дијаграма секторске координате, слика 6.5, потребно је одредити пол, Q и нулту тачку O1. Пол се углавном усваја на оси симетрије да би дијаграм био што једноставнији. Нулта тачка се усваја на месту где се линије секу. Најједноставнији је случај када се пол и нулта тачка поклапају.

$$\omega_Q(O_1, s) = \omega_Q = ds \cdot h_Q$$

За тачку O₁:

$$ds = 0 \rightarrow \omega_Q^{O_1} = 0$$

За тачку 1:

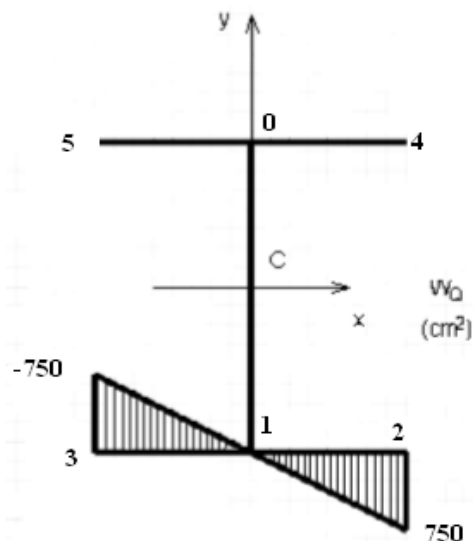
$$ds = 0 \rightarrow \omega_Q^1 = 0$$

За тачку 2:

$$ds = 0, \rightarrow \omega_Q^2 = h \cdot \frac{b}{2} = 750 \text{ cm}^2$$

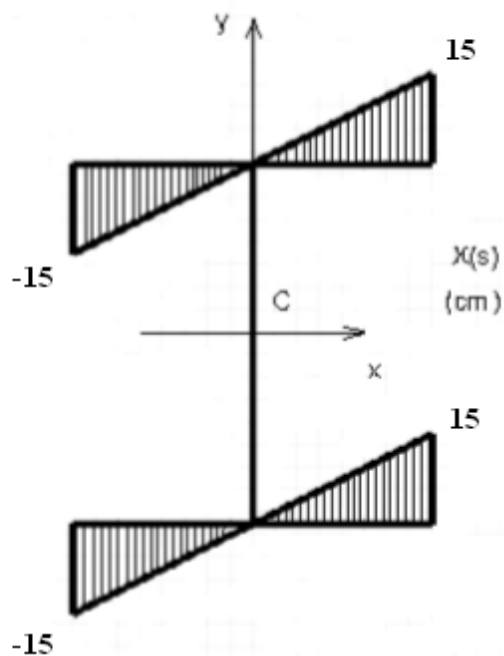
За тачку 3:

$$ds = 0, \rightarrow \omega_Q^3 = -h \cdot \frac{b}{2} = -750 \text{ cm}^2$$



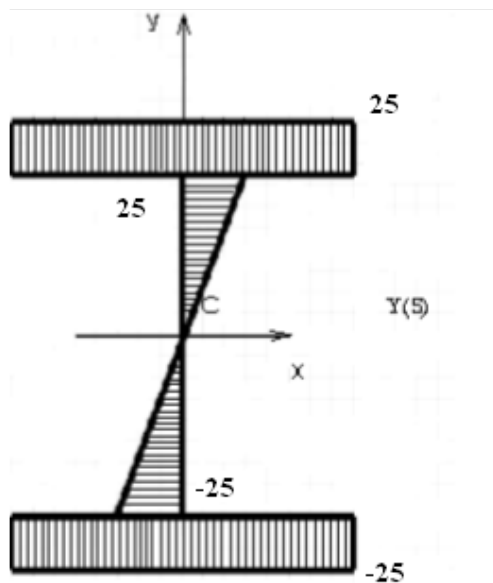
Слика 6.5 Дијаграм секторске координате

- На слици 6.6 приказан је дијаграм промене координате x .



Слика 6.6 Дијаграм промене координате x

- На слици 6.7 приказан је дијаграм промене координате y .



Слика 6.7 Дијаграм промене координате y

- Координате центра смицања

$$X_Q = 0$$

$$Y_Q = \frac{h}{2}$$

$$X_D = X_Q + \frac{I_{ywQ}}{I_x}$$

$$Y_D = Y_Q - \frac{I_{xwQ}}{I_y}$$

$$e1 = \frac{I_{xwQ}}{I_y} = \frac{\frac{b^3 \cdot \delta \cdot h}{12}}{\frac{b^3 \cdot \delta}{6}} = \frac{h}{2}$$

- Дијаграм секторске карактеристике за центар смицања, слика 6.8.

$$\omega_D(O_1, s) = \omega_D = ds \cdot h_D$$

За тачку O_1 :

$$ds = 0 \rightarrow \omega_D^{O_1} = ds \cdot h_D = 0$$

За тачку 1:

$$ds = 0 \rightarrow \omega_D^{O_1} = ds \cdot h_D = 0$$

За тачку 2:

$$\omega_D^2 = \frac{b}{2} \cdot e2 = 375 \text{ cm}^2$$

За тачку 3:

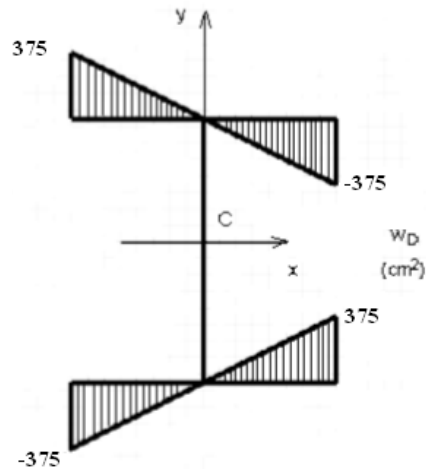
$$\omega_D^3 = -\frac{b}{2} \cdot e2 = -375 \text{ cm}^2$$

За тачку 4:

$$\omega_D^4 = -\frac{b}{2} \cdot e1 = -375 \text{ cm}^2$$

За тачку 5:

$$\omega_D^5 = \frac{b}{2} \cdot e2 = 375 \text{ cm}^2$$



Слика 6.8 Дијаграм секторске карактеристике за центар смицања

- Одређивање нормиране секторске координате:

$$\Omega(O, s) = \omega_D + \omega_o$$

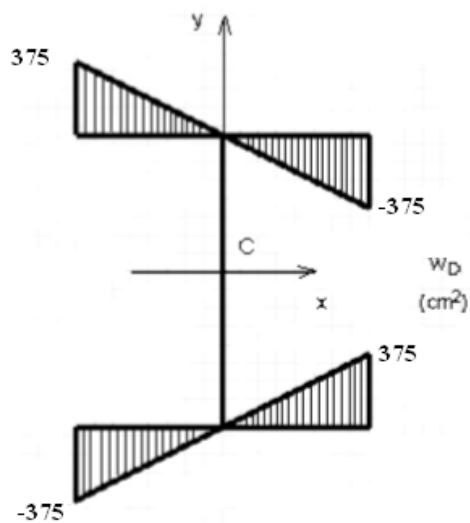
Нова нулта тачка

$$\omega_o = -\frac{S_{\omega_D}}{A}, \quad S_{\omega_D} = \int_A \omega_D \cdot dA = \delta \int_s \omega_D \cdot ds = \delta \int_s \omega_D \cdot 1 \cdot ds = 0$$

Одакле следи да је:

$$\omega_o = 0 \rightarrow \Omega(0, s) = \omega_D(0_1, s)$$

На слици 6.9 приказан је дијаграм нормиране секторске координате.



Слика 6.9 Нормирана секторска координата

- Одређивање Секторског момента инерције:

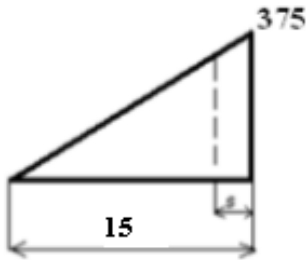
$$I_{\Omega 1} = 2 \cdot \left[\frac{\delta \cdot b}{6} \cdot \left(\frac{b \cdot h^2}{4} \right) + \frac{\delta \cdot b}{6} \cdot \left(\frac{b \cdot h^2}{4} \right) \right]$$

$$I_{\Omega 1} = \frac{b^3 \cdot \delta \cdot h^3}{24} = \frac{30^3 \cdot 2,8 \cdot 50^2}{24} = 7875000 \text{ cm}^6$$

Секторски статистички момент добија се премножавањем јединичног дијаграма и дијаграма секторске координате за центар смицања.

$$S_{\Omega} = \int_A \Omega \cdot dA$$

ако је $\delta = \text{const} \rightarrow S_{\Omega} = \delta \int_s \Omega \cdot ds$



$$\Omega_{(2)}: \Omega_{(s)} = 15: (15 - s)$$

$$\Omega_{(s)} = \frac{(15 - s)\Omega_{(2)}}{15}$$

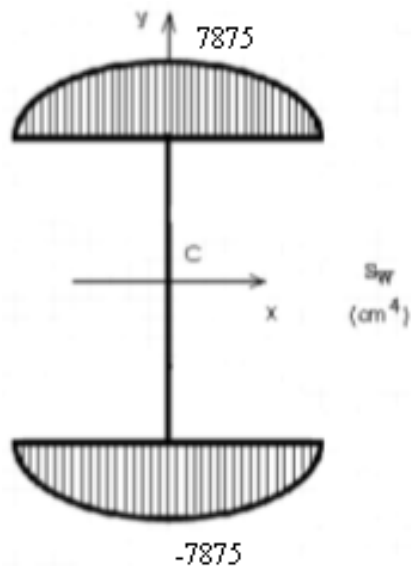
$$S_{\Omega}^{1-2} = \delta \cdot \int_0^s \frac{(15 - s)\Omega_{(2)}}{15} ds$$

$$S_{\Omega}^{1-2} = \delta \cdot \int_0^s \frac{5,625 - 375s}{15} ds = \frac{5,625}{15} \cdot s \Big|_0^{15} - \frac{375}{15} \cdot \frac{s^2}{2} \Big|_0^{15}$$

$$\text{za } s = 15 \quad S_{\Omega}^{1-2} = 7875000$$

za $s = 0$ $S_{\Omega}^{1-2} = 0$

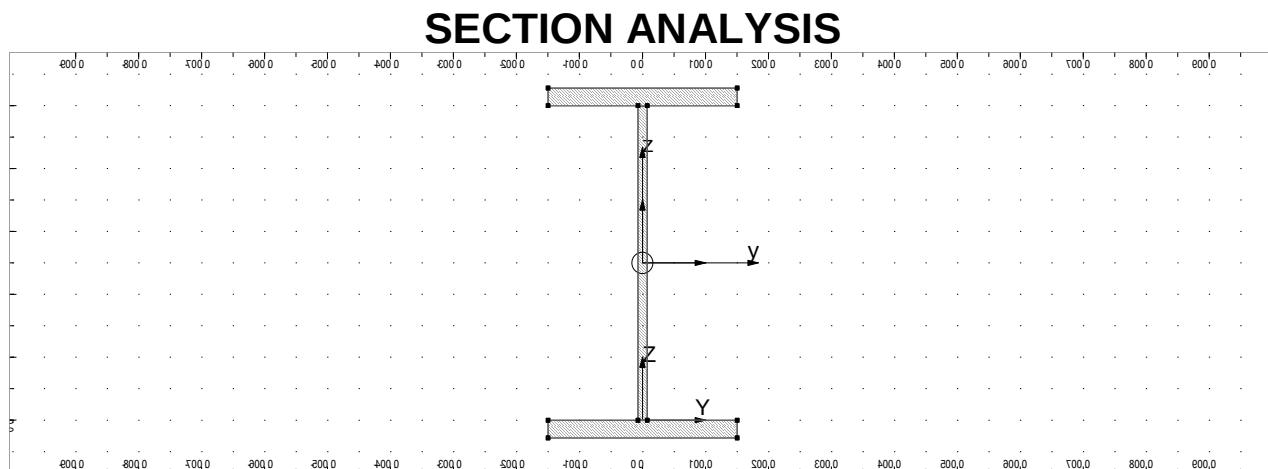
На слици 6.10 приказан је дијаграм секторског статичког момента инерције.



Слика 6.10 Дијаграм секторског статичког момента

6.2 Прорачун профила одрађен у програму Robot Structural Analysis

На слици 6.11 приказан је попречни пресек НЕВ 500 профила.



Слика 6.11 Пресек профила

Следе карактеристике поречног пресека које даје софтвер:

На слици 6.11 приказана је напонска анализа.

Geometry description

Point no.	Y	Z	
1	0 mm	250 mm	
2	0 mm	-250 mm	
3	150 mm	-250 mm	
4	-150 mm	-250 mm	
5	150 mm	250 mm	
6	-150 mm	250 mm	

Edge no.	Point P1	Point P2	Thickness
1	1	2	15 mm
2	2	3	28 mm
3	2	4	28 mm
4	1	5	28 mm
5	1	6	28 mm

General results

Area	A	=	24050 mm ²
Center of gravity	Yc	=	0 mm
	Zc	=	0 mm
Shear center	Yr	=	0 mm
	Zr	=	0 mm
Base material	STEEL		
	E	=	205000.00 MPa
	den	=	7852.83 kg/m ³
	WU	=	188.86 kG/m

Principal system

Angle	alpha	=	0.0 Deg
Moments of inertia	Ix	=	4372962 mm ⁴
	Iy	=	1202139267 mm ⁴
	Iz	=	126127026 mm ⁴
Sectional moments of inertia	Iomy	=	0 mm ⁵
	Iomz	=	0 mm ⁵

$$I_{om} = 787500000000 \text{ mm}^6$$

Maximum distances

$$\begin{aligned} V_y &= 150 \text{ mm} \\ V_{py} &= 150 \text{ mm} \\ V_z &= 250 \text{ mm} \\ V_{pz} &= 250 \text{ mm} \end{aligned}$$

Values in characteristic points

no	y(s) [mm]	z(s) [mm]	omega(s) [mm ²]	A(s) [mm ²]	Sy(s) [mm ³]	Sz(s) [mm ³]	Som(s) [mm ⁴]
1	0	250	0	4200	1050000	-315000	-78750000
2	0	-250	0	4200	-1050000	-315000	78750000
3	150	-250	-37500	0	0	0 0	
4	-150	-250	37500	0	0	0 0	
5	150	250	37500	0	0	0 0	
6	-150	250	-37500	0	0	0 0	

Central system

Moments of inertia

$$\begin{aligned} I_{yc} &= 1202139267 \text{ mm}^4 \\ I_{zc} &= 126127026 \text{ mm}^4 \\ I_{yczc} &= 0 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

Maximum distances

$$\begin{aligned} V_{yc} &= 150 \text{ mm} \\ V_{pyc} &= 150 \text{ mm} \\ V_{zc} &= 250 \text{ mm} \\ V_{pzc} &= 250 \text{ mm} \end{aligned}$$

Arbitrary system

Angle

$$\alpha = 0.0 \text{ Deg}$$

Moments of inertia

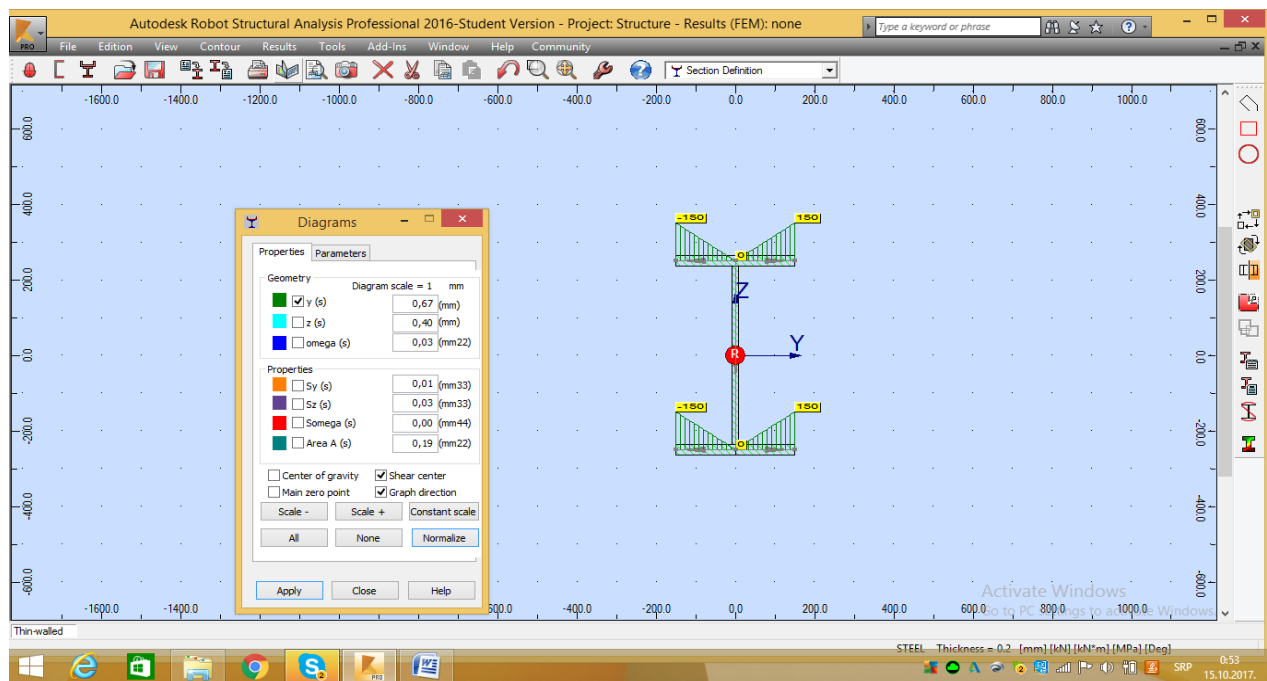
$$\begin{aligned} I_{y'} &= 1202139267 \text{ mm}^4 \\ I_{z'} &= 126127026 \text{ mm}^4 \\ I_{y'z'} &= 0 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

Maximum distances

$$\begin{aligned} V_{y'} &= 150 \text{ mm} \\ V_{py'} &= 150 \text{ mm} \\ V_{z'} &= 250 \text{ mm} \\ V_{pz'} &= 250 \text{ mm} \end{aligned}$$

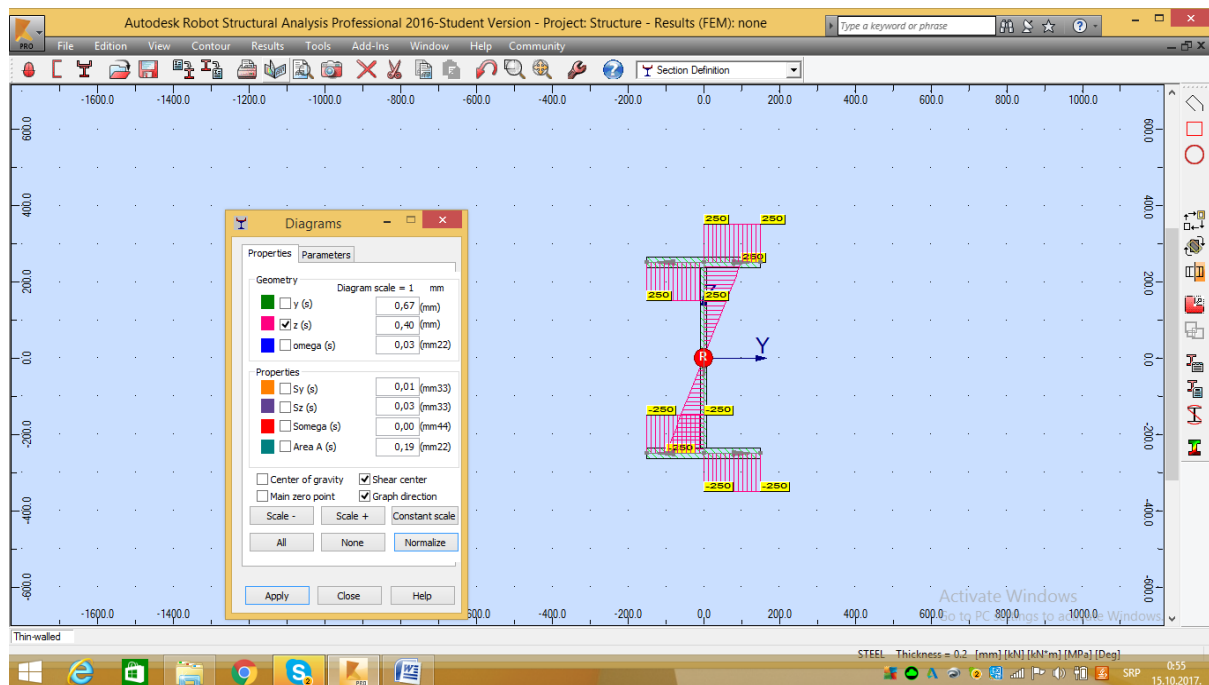
У оквиру овога, програм даје могућност графичког приказа појединих карактеристика попречног пресека и њихове промене по контури профила.

На слици 6.12 приказан је дијаграм у-координате.



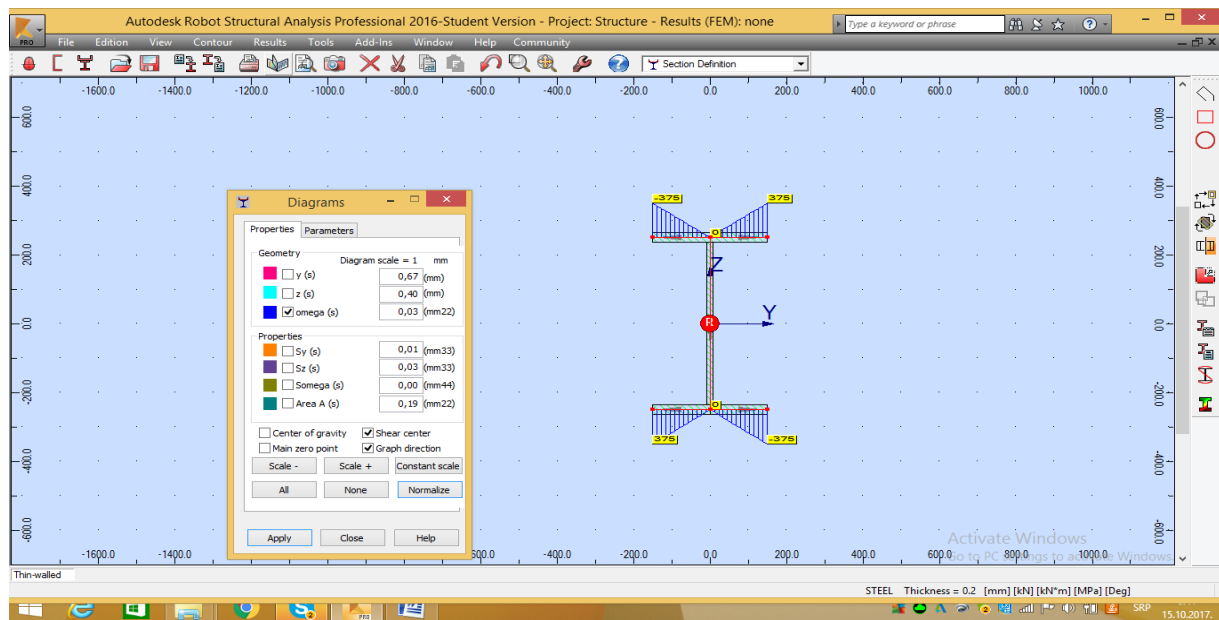
Слика 6.12 Дијаграм у-координате

На слици 6.13 приказан је дијаграм z-координате.



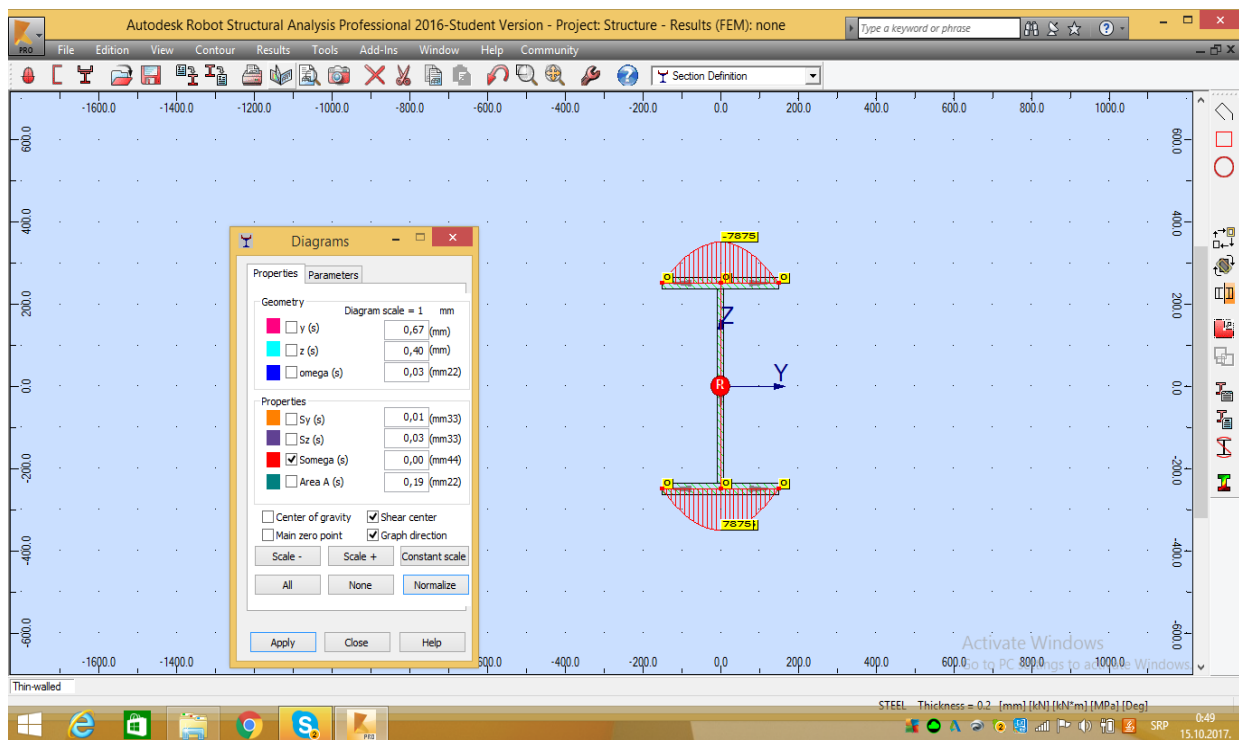
Слика 6.13 Дијаграм z-координате

На слици 6.14 приказан је дијаграм секторске координате омега:



Слика 6.14 Дијаграм секторске координате омега

На слици 6.15 приказан је S-омега дијагра.



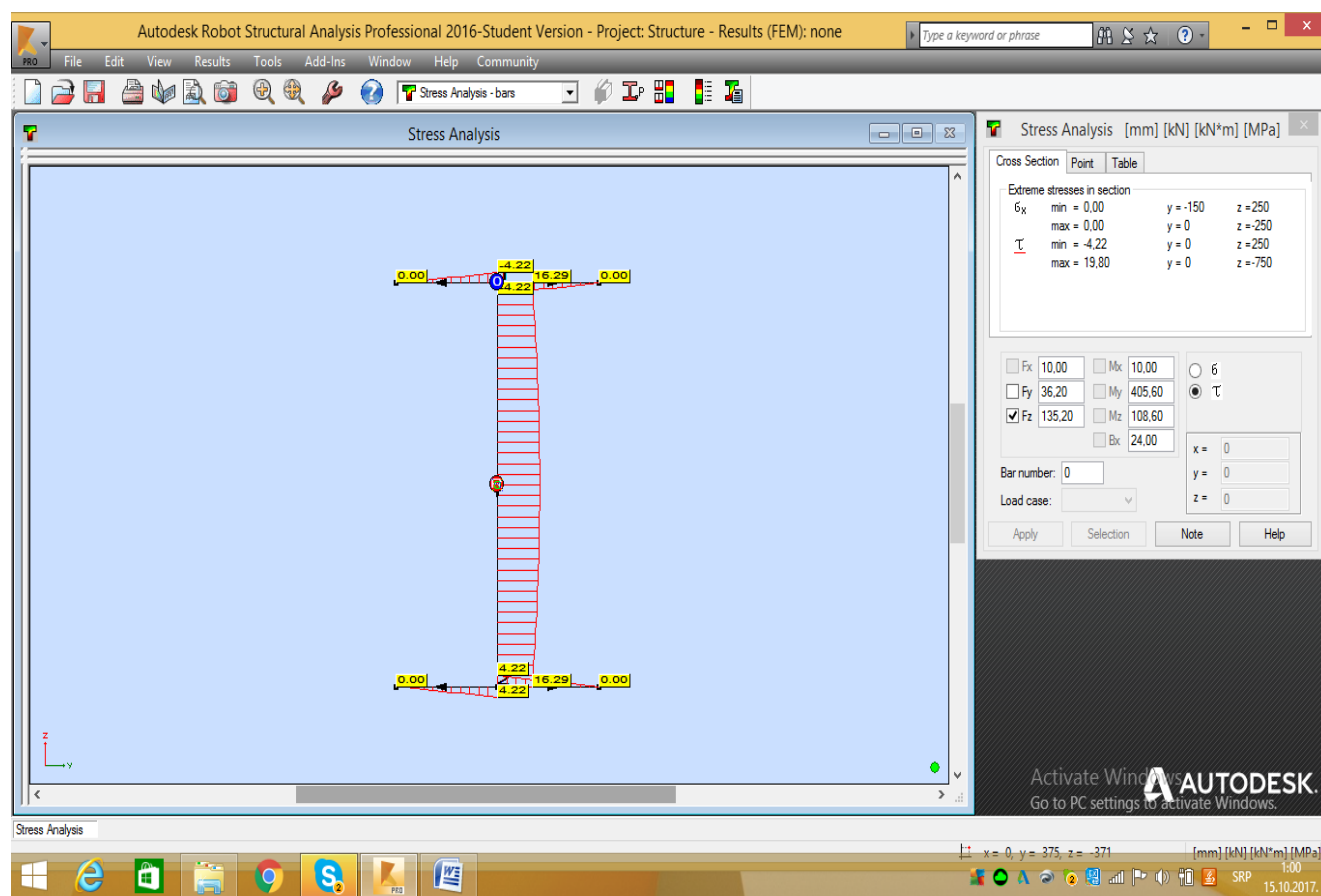
Слика 6.15 S-омега дијаграм.

Анализа напона:

На следећим сликама је анализа напона помоћу софтвера Robot Structural Analysis и то појединачно од појединих оптерећења и на крају збирно при истовраменом дејству и трансферзалних сила (смицање) и момената савијања око оса y и z (нормални и смицајни напони) и на крају бимомента.

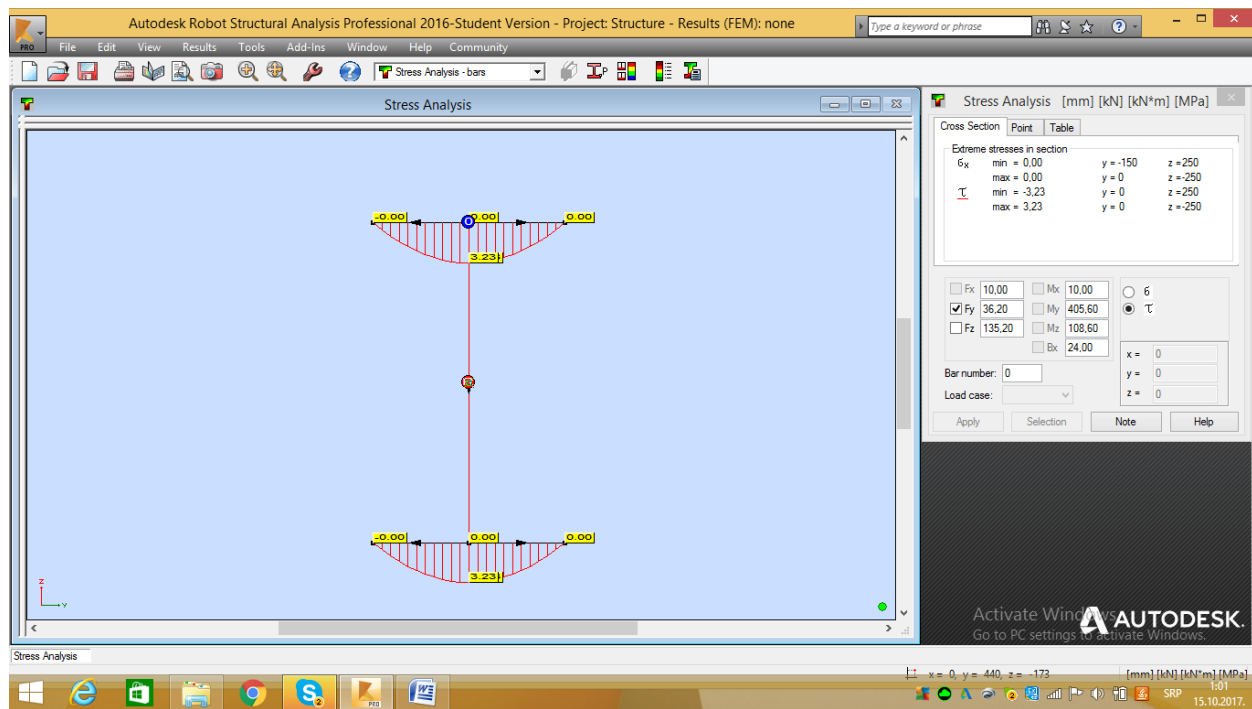
Бимомент се јавља само као унутрашње оптерећење због специфичног понашања танкозидних профила при увијању. То је појава неуниформне (спречене) торзије и депланације попречног пресека при томе.

На слици 6.16 приказани су смицајни напони само од силе F_z



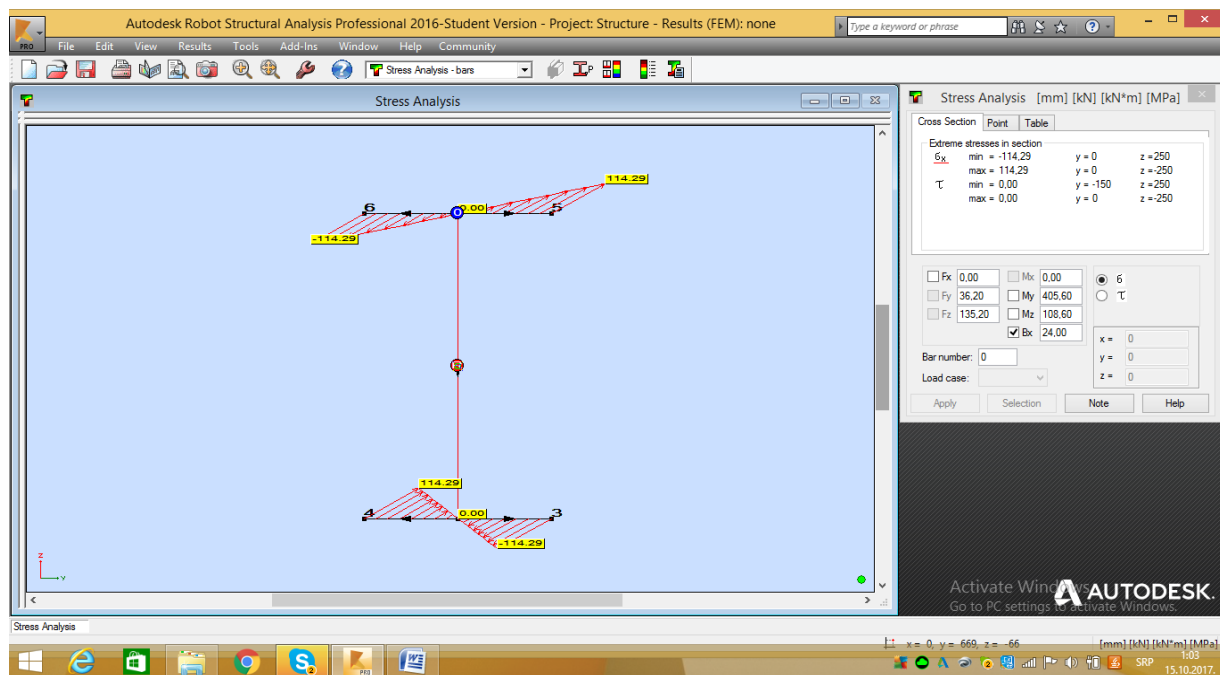
Слици 6.16 Смицајни напони само од силе F_z

На слици 6.17 приказани су смицајни напони само од силе F_y



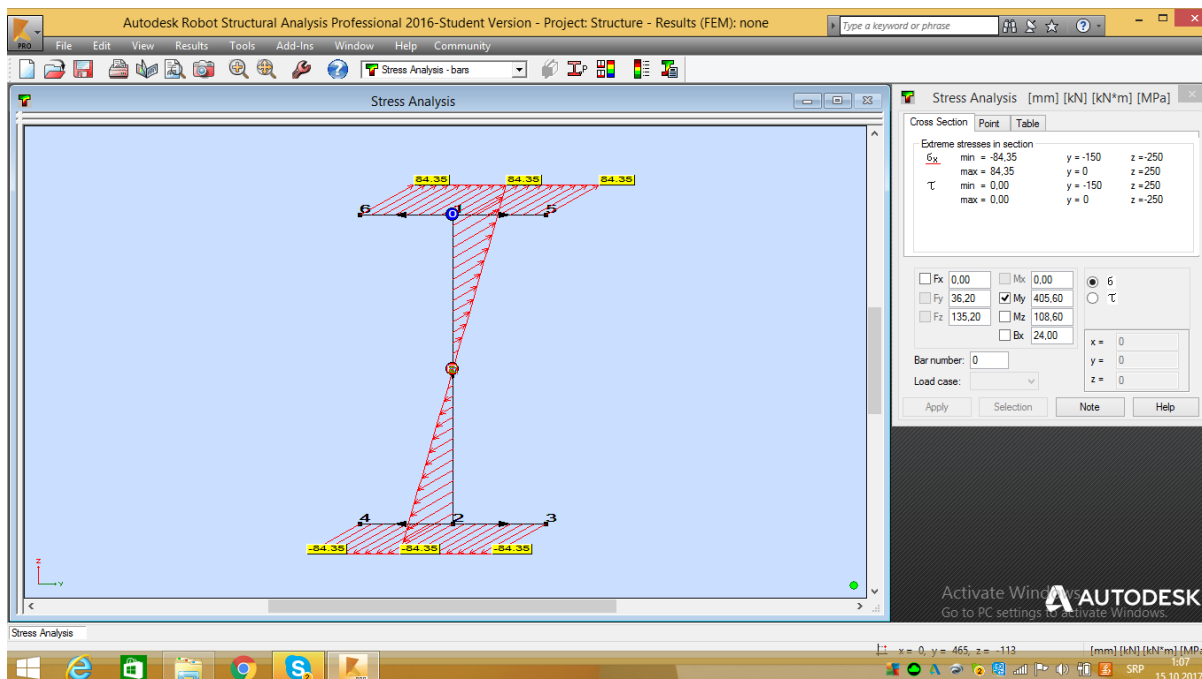
Слици 6.17 Смицајни напони само од силе F_y

На слици 6.18 приказани су нормални напони од бимомента.



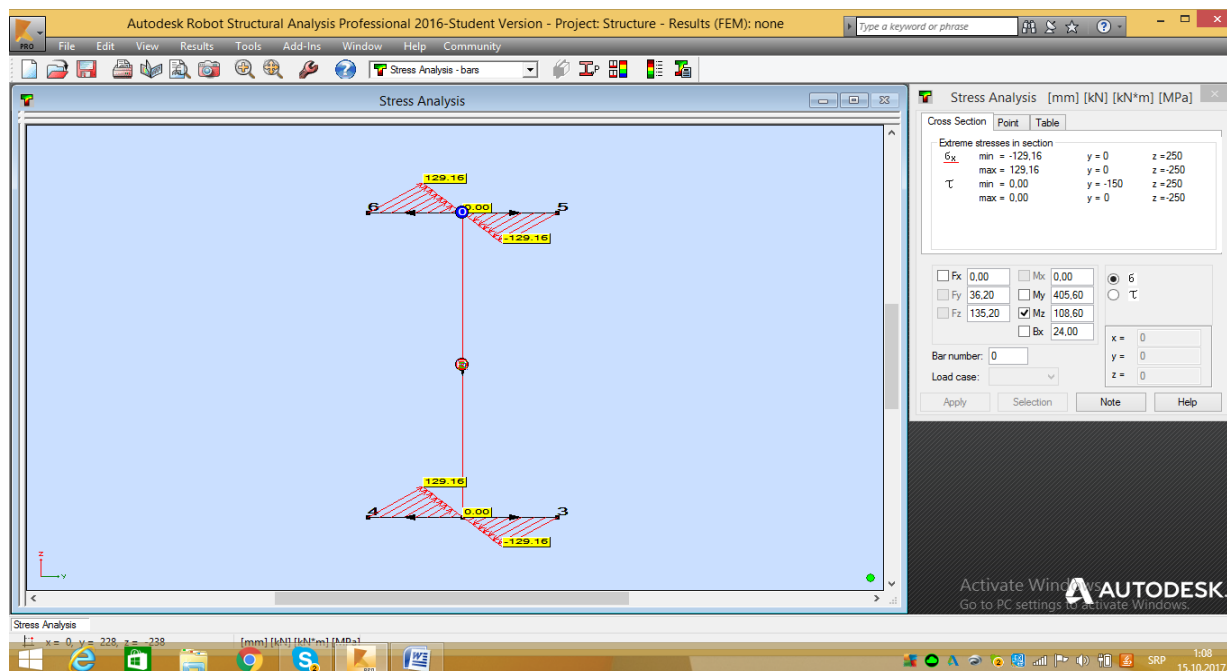
Слици 6.18 Нормални напони од бимомента

На слици 6.19 приказани су напони од M_y .



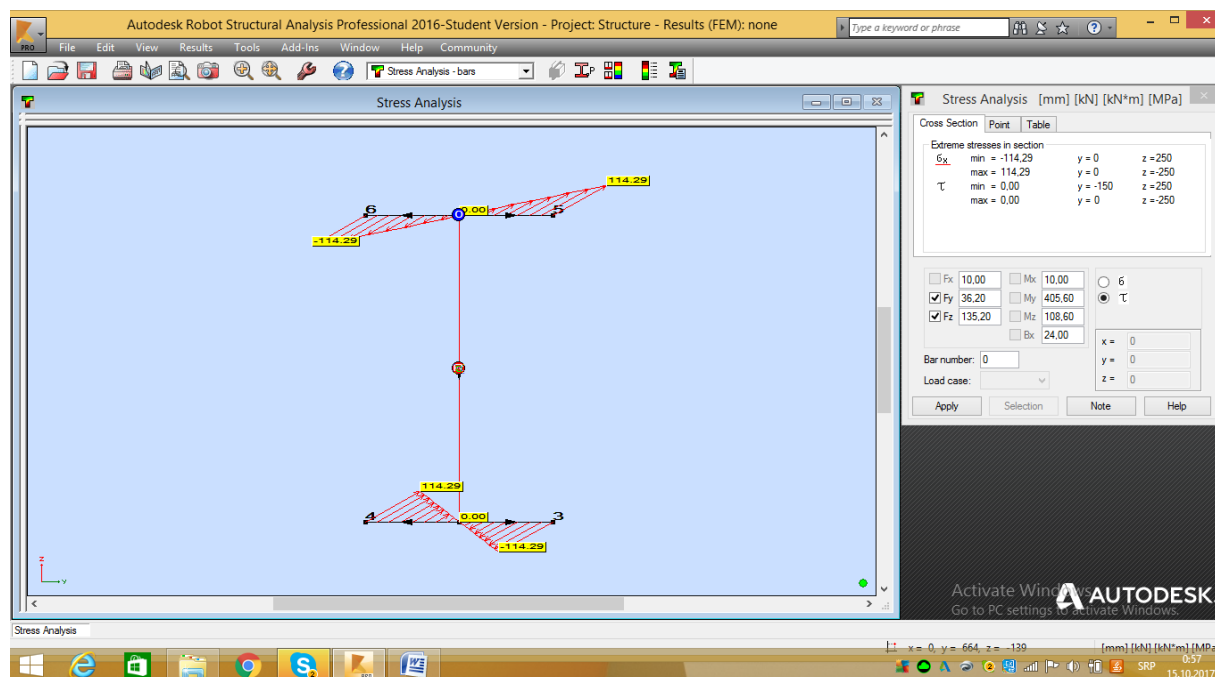
Слици 6.19 Напони од M_y

На слици 6.20 приказани су напони од M_z .



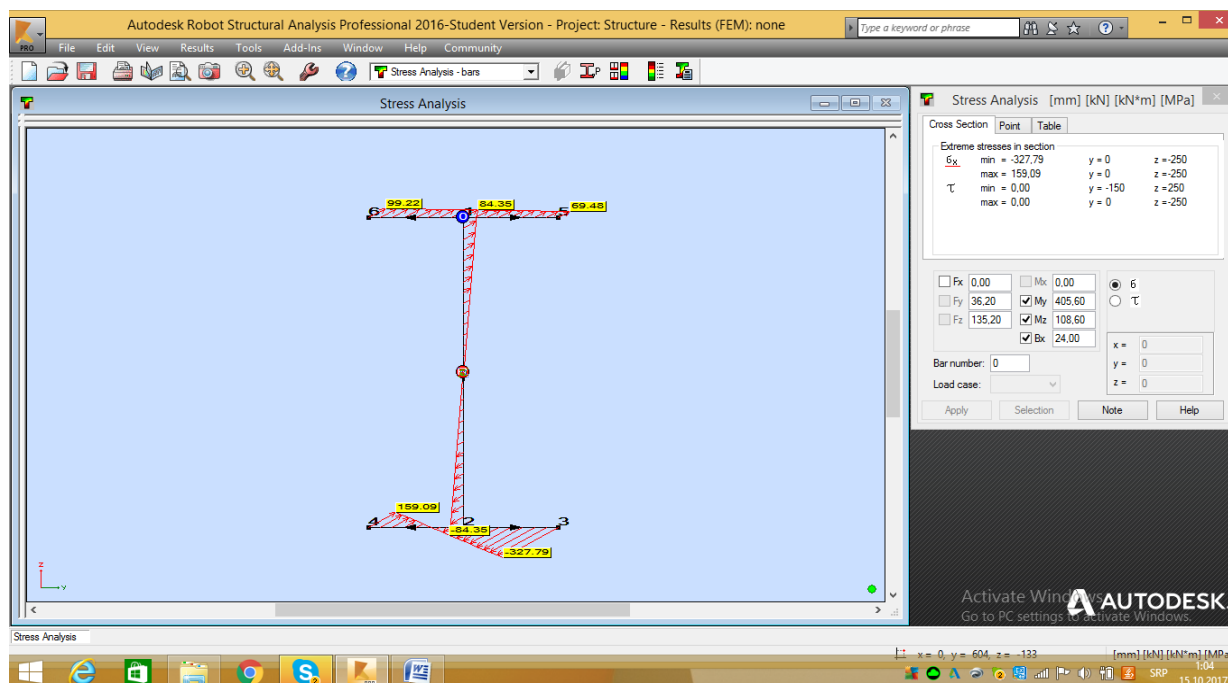
Слици 6.20 Напони од M_z

На слици 6.21 приказани су смицајни напони од обе трансферзалне силе.



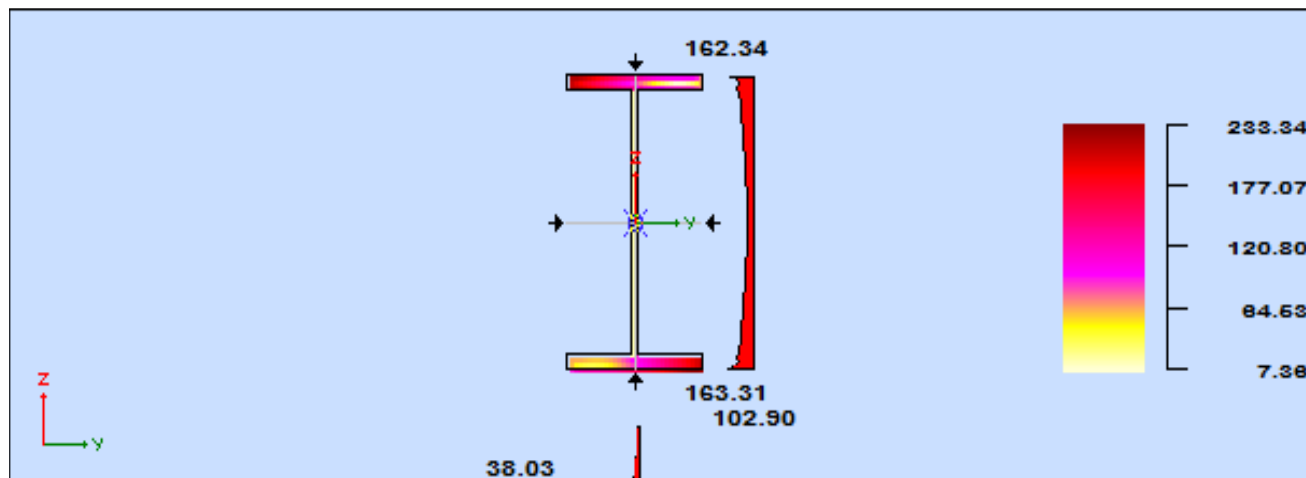
Слика 6.21 Смицајни напони од обе трансферзалне силе

На слици 6.22 приказани су укупни напони од оба момента савијања и бимоментна.



Слика 6.23 Напони од оба момента савијања и бимоментна

На слици 6.24 приказана је напонска анализа –укупни напони Мизесови напони у означеном пресеку



Слика 6.24 вон Мизесови напони

Задата оптерећења:

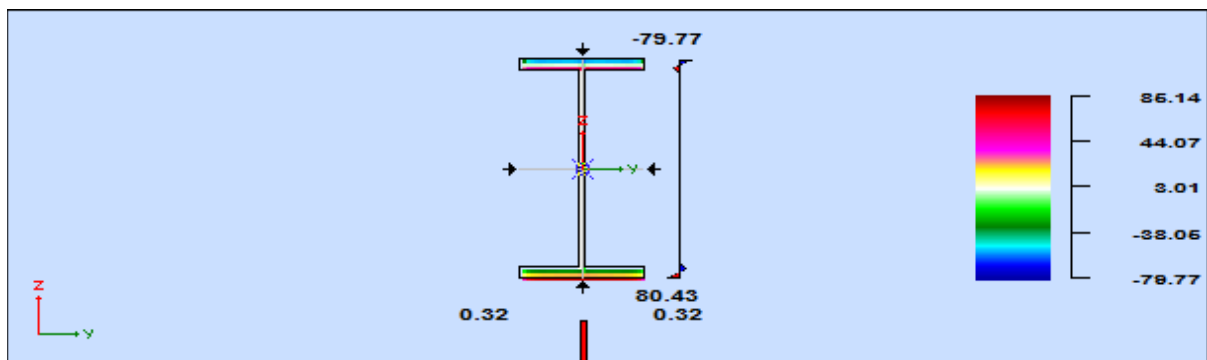
$F_x = 0.00 \text{ kN}$ $M_x = 13.52 \text{ kN}\cdot\text{m}$
 $F_y = 36.20 \text{ kN}$ $M_y = 405.60 \text{ kN}\cdot\text{m}$
 $F_z = 135.20 \text{ kN}$ $M_z = 108.80 \text{ kN}\cdot\text{m}$

Резултати напона:

$S_x \text{ max}$	$S_x \text{ min}$	$t_{xy} \text{ max}$	$t_{xz} \text{ max}$	
Напони	214.62 MPa	-214.62 MPa	85.14 MPa	80.58 MPa
Y	-150 mm	150 mm	10 mm	7 mm
Z	278 mm	-278 mm	252 mm	247 mm

	t_{max}	$S_i \text{ max}$
Напони	88.78 MPa	233.34 MPa
Y local	7 mm	131 mm
Z local	252 mm	-278 mm

На слици 6.25 приказани су смичући напони у означеном пресеку напони.



Слика 6.25

Задата оптерећења:

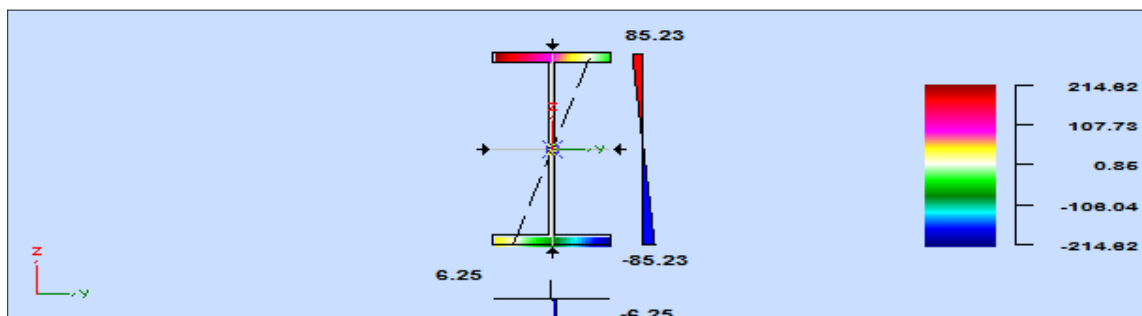
$F_x = 0.00 \text{ kN}$ $M_x = 13.52 \text{ kN}\cdot\text{m}$
 $F_y = 36.20 \text{ kN}$ $M_y = 405.60 \text{ kN}\cdot\text{m}$
 $F_z = 135.20 \text{ kN}$ $M_z = 108.80 \text{ kN}\cdot\text{m}$

Резултати напона:

$S_x \text{ max}$	$S_x \text{ min}$	$t_{xy} \text{ max}$	$t_{xz} \text{ max}$	
Напони	214.62 MPa	-214.62 MPa	85.14 MPa	80.58 MPa
Y	-150 mm	150 mm	10 mm	7 mm
Z	278 mm	-278 mm	252 mm	247 mm

	t_{max}	$S_i \text{ max}$
Напони	88.78 MPa	233.34 MPa
Y local	7 mm	131 mm
Z local	252 mm	-278 mm

На слици 6.26 приказани су нормални напони.



Слика 6.26 Нормални напони

Задата оптерећења:

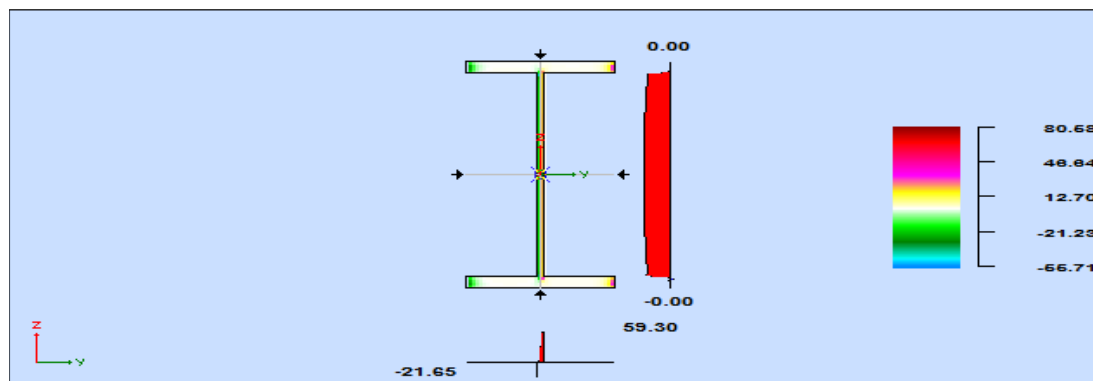
$F_x = 0.00 \text{ kN}$ $M_x = 13.52 \text{ kN}\cdot\text{m}$
 $F_y = 36.20 \text{ kN}$ $M_y = 405.60 \text{ kN}\cdot\text{m}$
 $F_z = 135.20 \text{ kN}$ $M_z = 108.80 \text{ kN}\cdot\text{m}$

Резултати напона:

$S_x \text{ max}$	$S_x \text{ min}$	$t_{xy} \text{ max}$	$t_{xz} \text{ max}$	
Напони	214.62 MPa	-214.62 MPa	85.14 MPa	80.58 MPa
Y	-150 mm	150 mm	10 mm	7 mm
Z	278 mm	-278 mm	252 mm	247 mm

	t_{max}	$S_i \text{ max}$
Напони	88.78 MPa	233.34 MPa
Y local	7 mm	131 mm
Z local	252 mm	-278 mm

На слици 6.27 приказани су смичући напони



Слика 6.27 Смичући напони

Задата оптерећења:

$F_x = 0.00 \text{ kN}$ $M_x = 13.52 \text{ kN}\cdot\text{m}$
 $F_y = 36.20 \text{ kN}$ $M_y = 405.60 \text{ kN}\cdot\text{m}$
 $F_z = 135.20 \text{ kN}$ $M_z = 108.80 \text{ kN}\cdot\text{m}$

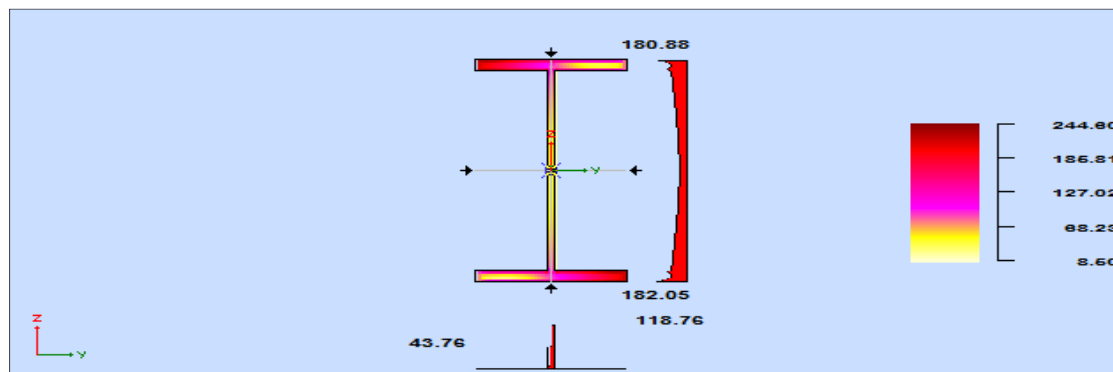
Резултати напона:

$S_x \text{ max}$	$S_x \text{ min}$	$t_{xy} \text{ max}$	$t_{xz} \text{ max}$
-------------------	-------------------	----------------------	----------------------

Напони	214.62 MPa	-214.62 MPa	85.14 MPa	80.58 MPa
Y	-150 mm	150 mm	10 mm	7 mm
Z	278 mm	-278 mm	252 mm	247 mm

	$t_{\max}$	$S_i \max$		
Напони	88.78 MPa	233.34 MPa		
Y local	7 mm	131 mm		
Z local		252 mm -278 mm		

На слици 6.28 приказан је смицајни напон у означеном пресеку



Слика 628 Смицајни напони у пресеку

Задата оптерећења:

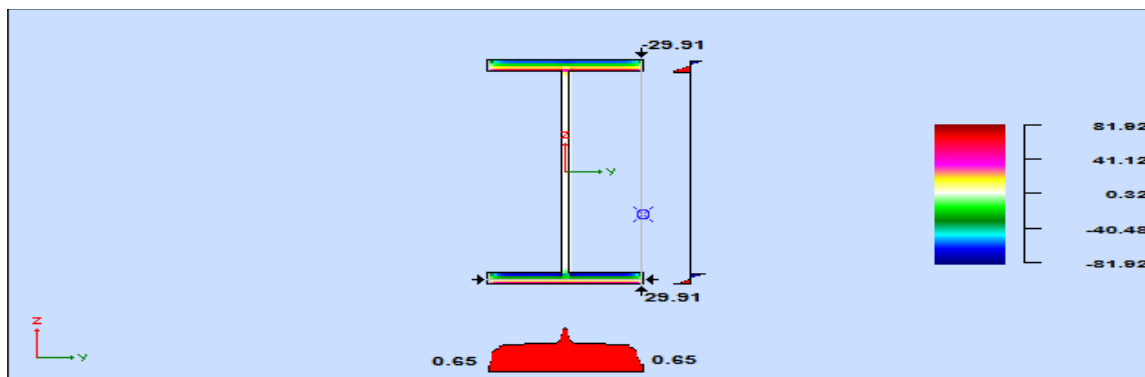
$F_x = 0.00 \text{ kN}$	$M_x = 13.52 \text{ kN}\cdot\text{m}$
$F_y = 36.20 \text{ kN}$	$M_y = 405.60 \text{ kN}\cdot\text{m}$
$F_z = 135.20 \text{ kN}$	$M_z = 108.80 \text{ kN}\cdot\text{m}$

Резултати напона:

$S_x \max$	$S_x \min$	$t_{xy} \max$	$t_{xz} \max$	
Напони	214.62 MPa	-214.62 MPa	85.14 MPa	80.58 MPa
Y	-150 mm	150 mm	10 mm	7 mm
Z	278 mm	-278 mm	252 mm	247 mm

	$t_{\max}$	$S_i \max$		
Напони	88.78 MPa	233.34 MPa		
Y local	7 mm	131 mm		
Z local		252 mm -278 mm		

На слици 6.29 приказан је смицајни напон у означеном пресеку.



Слика 6.29 Смицајни напон у означеном пресеку

Задата оптерећења:

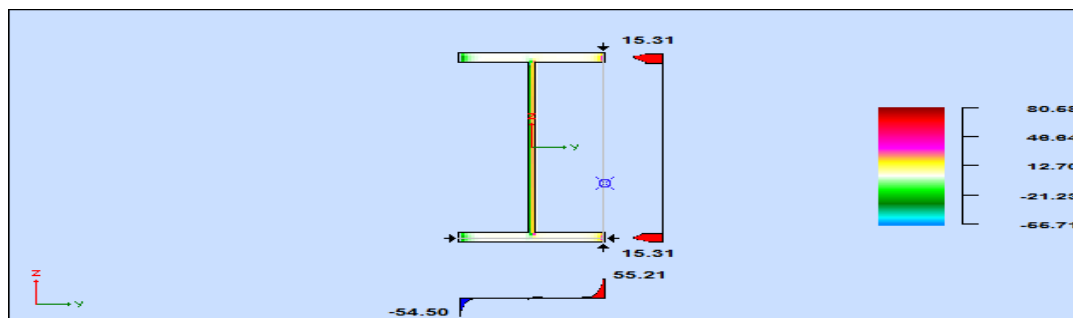
$F_x = 0.00 \text{ kN}$ $M_x = 13.52 \text{ kN}\cdot\text{m}$
 $F_y = 36.20 \text{ kN}$ $M_y = 405.60 \text{ kN}\cdot\text{m}$
 $F_z = 135.20 \text{ kN}$ $M_z = 108.80 \text{ kN}\cdot\text{m}$

Резултати напона:

$S_x \text{ max}$	$S_x \text{ min}$	$t_{xy} \text{ max}$	$t_{xz} \text{ max}$	
Напони	214.62 MPa	-214.62 MPa	85.14 MPa	80.58 MPa
Y	-150 mm	150 mm	10 mm	7 mm
Z	278 mm	-278 mm	252 mm	247 mm

	t_{max}	$S_i \text{ max}$
Напони	88.78 MPa	233.34 MPa
Y local	7 mm	131 mm
Z local		252 mm -278 mm

На слици 6.30 приказан је нормални напон у означеном пресеку



Слика 6.40 Нормални напон у означеном пресеку

Задата оптерећења:

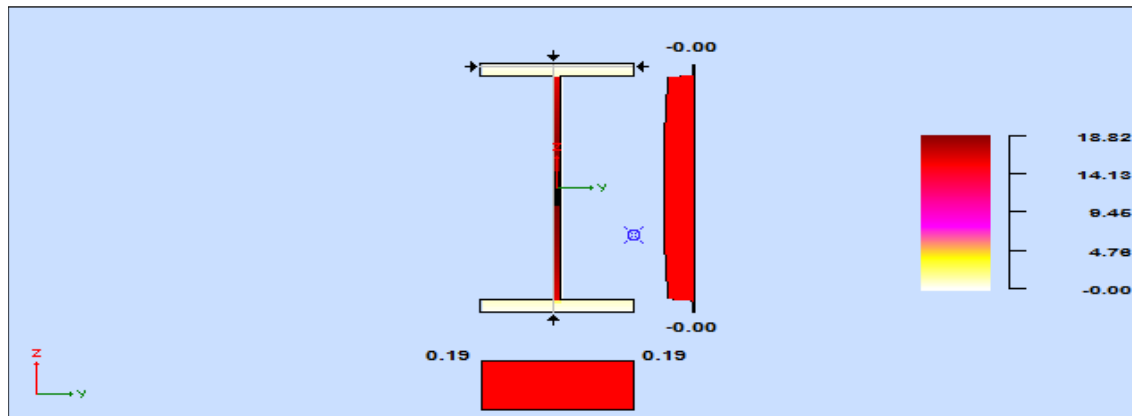
$F_x = 0.00 \text{ kN}$ $M_x = 13.52 \text{ kN}\cdot\text{m}$
 $F_y = 36.20 \text{ kN}$ $M_y = 405.60 \text{ kN}\cdot\text{m}$
 $F_z = 135.20 \text{ kN}$ $M_z = 108.80 \text{ kN}\cdot\text{m}$

Резултати напона:

	$S_x \text{ max}$	$S_x \text{ min}$	$t_{xy} \text{ max}$	$t_{xz} \text{ max}$
Напони	214.62 MPa	-214.62 MPa	85.14 MPa	80.58 MPa
Y	-150 mm	150 mm	10 mm	7 mm
Z	278 mm	-278 mm	252 mm	247 mm

	t_{max}	$S_i \text{ max}$
Напони	88.78 MPa	233.34 MPa
Y local	7 mm	131 mm
Z local		252 mm -278 mm

На слици 6.31 приказан је цмицајни напон у означеном пресеку



Слика 6.31

Задата оптерећења:

$F_x = 0.00 \text{ kN}$ $M_x = 13.52 \text{ kN}\cdot\text{m}$
 $F_y = 36.20 \text{ kN}$ $M_y = 405.60 \text{ kN}\cdot\text{m}$
 $F_z = 135.20 \text{ kN}$ $M_z = 108.80 \text{ kN}\cdot\text{m}$

Резултати напона:

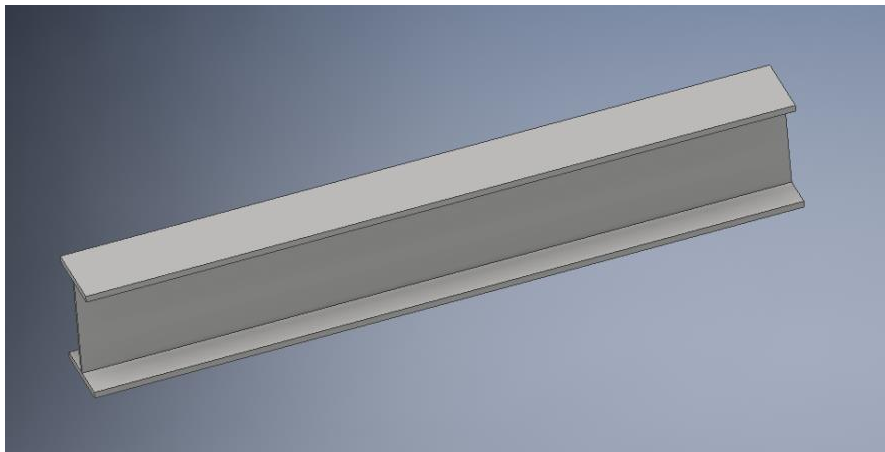
	$S_x \text{ max}$	$S_x \text{ min}$	$t_{xy} \text{ max}$	$t_{xz} \text{ max}$
--	-------------------	-------------------	----------------------	----------------------

Напони	214.62 MPa	-214.62 MPa	85.14 MPa	80.58 MPa
Y	-150 mm	150 mm	10 mm	7 mm
Z	278 mm	-278 mm	252 mm	247 mm

	t_{max}	$S_i \max$		
Напони	88.78 MPa	233.34 MPa		
Y local	7 mm	131 mm		
Z local		252 mm -278 mm		

6.3 Напонска анализа и деформација профила одрађена у програму CATIA

Напонска анализа и деформација профила НЕВ 500 одређена је помоћу програмског пакета CATIA. CATIA нам нуди изузетно велики број могућности, поред скицирања, моделирања и израде техничке документације, погодан је и за прорачун разних делова на разна врста оптерећења са детаљним прорачуном и сликовитим приказом понашања модела при дејством оптерећења. 3D модел профила НЕВ 500 приказан је на слици 6.33

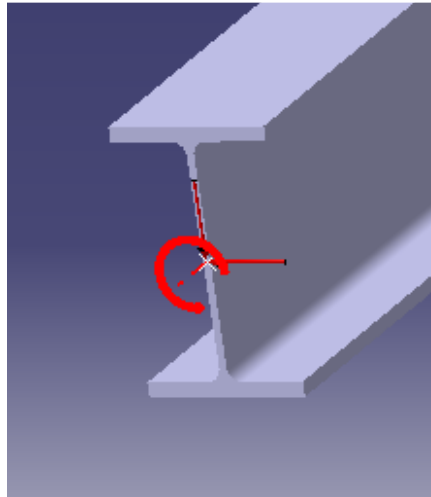


Слика 6.33 3D модел профила НЕВ 500

Приликом овог прорачуна врши се испитивање силом од 140 kN које је под углом од 75°. Затим је сила је разложена на трансверзалну и аксијалну.

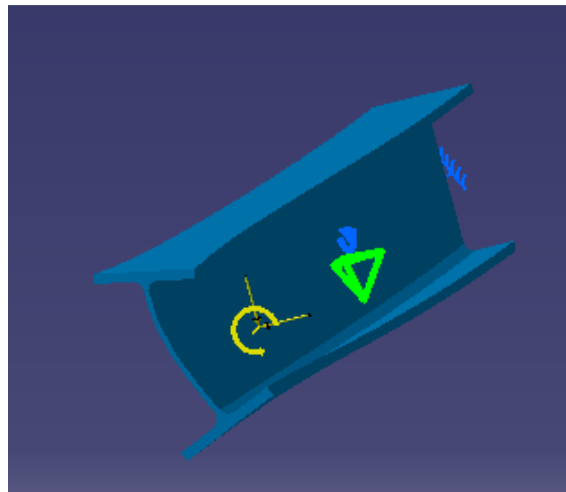
Напонска анализа одрађена је помоћу опције Stress Analysis. Уласком у опцију Stress Analysis нуди се више различитих могућности. У опцији Create Simulation по отварању нове симулације почиње се са уношењем ограничења и оптерећења. У подручју Constraints бира се опција Fixed, помоћу које се одређује где ће профил бити ослоњен. Након постављање ослонаца прелази се на дефинисање силе. [9]

На слици 6.34 приказан је момент увијања који делује у правцу x осе и силе које делују у тежишту. Вредност момента увијања износи 13,52 kNm, вредност трансверзалне силе износи 135,2 kN, а аксијалне 36,2 kN.



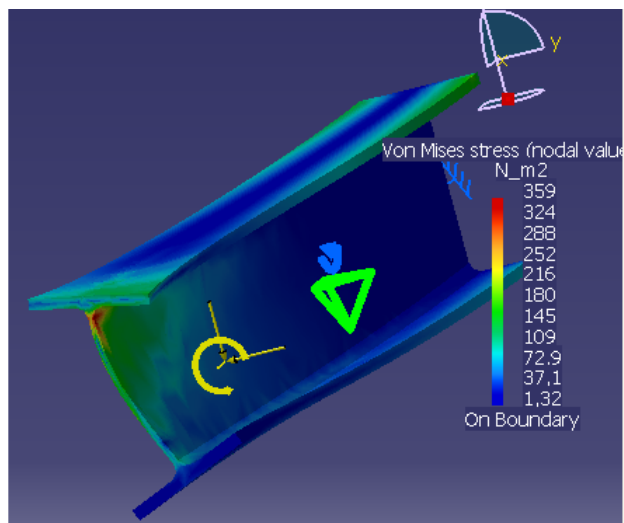
Слика 6.34 Момент увијања и силе у тежишту

Деформације које се јављају приликом момента увијања и сила у тежишту, приказане су на слици 6.35



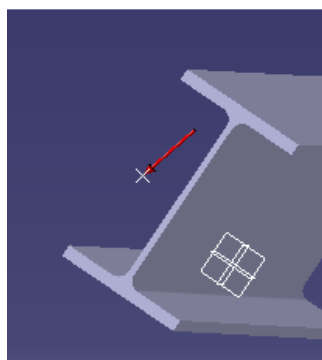
Слика 6.35 Деформације приликом момента увијања и сила

На слици 6.36 приказани су напони услед деловања момената увијања и силе које делују у тежишту.



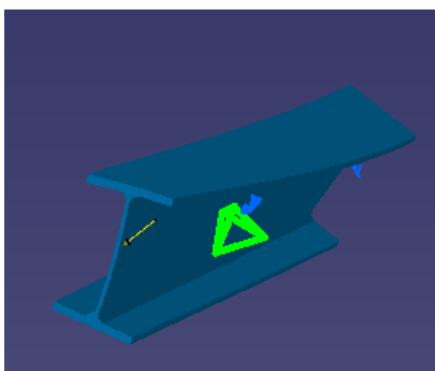
Слика 6.36 Напони услед момента увијања и сила које делују у тежишту

На слици 6.37 приказана је само сила од 140 kN, која делује ван профила под углом од 75°.



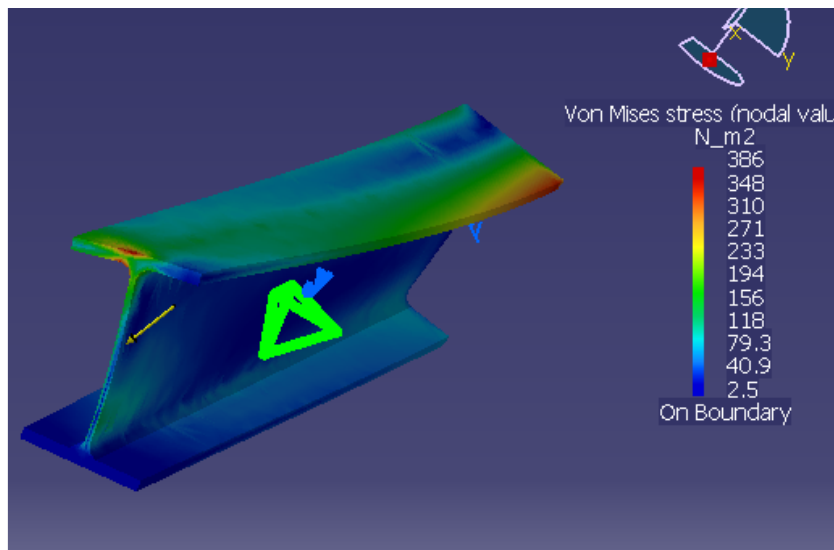
Слика 6.37 Сила које делује ван профила

На слици 6.38 приказана је деформација која се јавља приликом деловања силе.



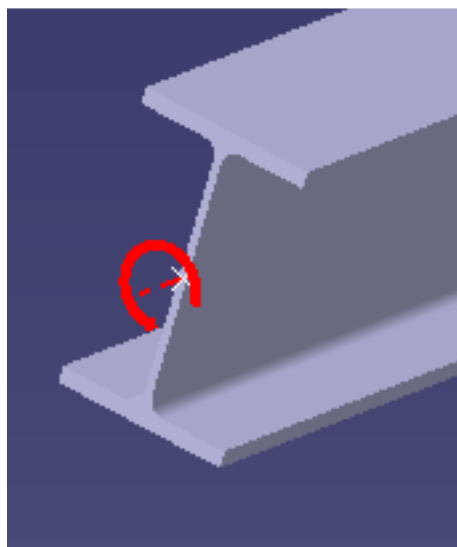
Слика 6.38 Деформације

На слици 6.39 приказани су напони који се јављају приликом деловања силе.



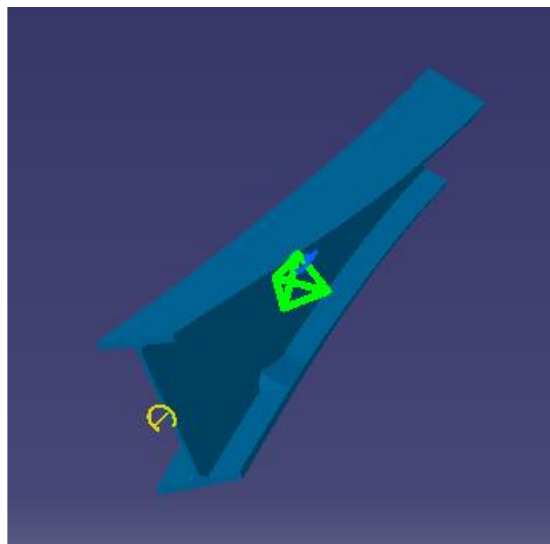
Слика 6.39 Напони при дејству косе силе под углом од 75°

На слици 6.40 приказан је само момент увијања који делује у правцу x осе и износи 13,52 kNm.



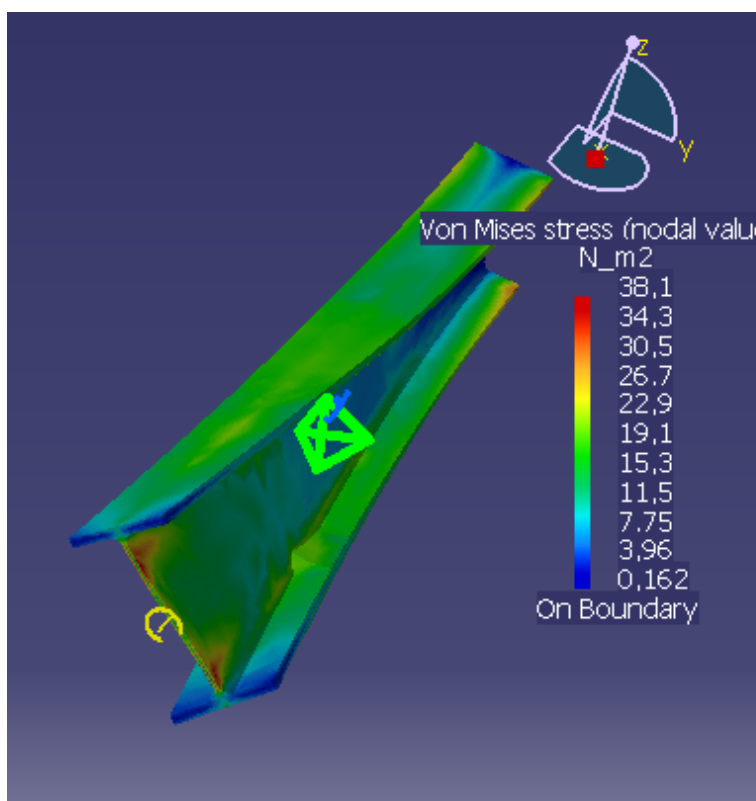
Слика 6.40 Момент увијања

Деформације које се јављају приликом момента увијања, приказане су на слици 6.41



Слика 6.41 Деформације приликом момента увијања

Напони који се јављају приказани су на слици 6.42



Слика 6.42 Вон Мизесови напони и деформације при дејству момента увијања

7. Закључак

. Адекватно димензионисање конструкције , везано је у првом реду за детаљну и правилну анализу свих дејстава на конструкцију или њен део. Оптерећења се комбинују у циљу израчунавања максималних напона у елементима конструкције. Дејствима се обухватају сва оптерећења и принудне деформације које могу да изазову утицаје у елементима конструкције. Она могу да буду различитог порекла и природе (статичка и динамичка).

Циљ овог мастер рада је прорачун и анализа напона и деформација сложено оптерећеног танкозидног профила. На самом почетку рада описан је кратак историјски развој металних конструкција. Затим је приказан теоријски део прорачуна конструкције, и само димензионисање различитим методама, такође је описан и прорачун према Еврокоду. Затим је извршен аналитички прорачун напона танкозидног профила под дејством сложеног (комбинованог) оптерећења. У овом раду извршено је испитивање НЕВ 500 профила и његових карактеристика попречног пресека. Посебна пажња је поклоњена одређивању секторских карактеристика танкозидног профила и прорачун је проверен у програму **Robot Structural Analysis** . Одређене су секторске карактеристике и приказани су дијаграми промена секторских координата по контури профила.

За овај профил извршена је напонска анализа на основу резултата добијених прво класичним прорачуном (заснованог на теорији еластичности и отпорности материјала), затим на други начин коришћењем могућности програма **Robot Structural Analysis** и резултата које он даје и на крају у програму **CATIA** приказана је мапа напона и деформација. Може се закључити да резултати добијени на други начин помоћу софтвера **Robot Structural Analysis** готово у потпуности одговарају резултатима добијеним класичним прорачуном у случају када се посматрају појединачана оптерећења. У збирном резултату, било да се рачунају Мизесови напони или не постоје извесна одступања која су била и очекивана због појединих поједностављења(ради лакшег рачуна) или занемаривањем малих величина код класичног прорачуна. Са друге стране **CATIA** пружа само поређење екстремних напона у појединим карактеристичним пресецима и даје приближно добре резултате.

Прорачун и анализа напона и деформација сложено оптерећених танкозидних носача, поготово ако је у питању и појава неуниформне (спречене) торзије је веома сложен задатак. Савремени софтвери дају довољно добре резултате и пре свега скраћују време решавања проблема. То ипак није главна педност оваквог поступка. Инжењеру остаје више времена за осмишљавање нових побољшаних конструкција, јер поступак може да се понавља много пута са лакоћом док се не постигне задовољавајуће конструкторско решење.

Литература

- [1] Петковић З., Оштрић Д., Металне конструкције у машиноградњи, Центар за механизацију, Београд 1996.
- [2] Марјановић В., Лаке металне конструкције-скрипта у електронском облику, Факултет инжењерских наука Крагујевац, 2016.
- [3] Марјановић В., Металне конструкције-скрипта у електронском облику, Факултет инжењерских наука Крагујевац, 2016.
- [4] Буђевац Д., Марковић З., Боговац Д., Тошић Д., Металне конструкције – Основе прорачуна и конструисања, Београд 1997.
- [5] http://www.grf.bg.ac.rs/p/learning/predavanje_1_lmk_1384335885940.pdf, (приступ 20. 06. 2017.)
- [6] Марковић З., Гранична стања челичних конструкција према Еврокоду, Београд 2014.
- [7] https://rudar.rgn.hr/~lfrgic/nids_lfrgic/PDF_OTPORNOST/Dijagrami%20naprezanja_R+N.pdf, (приступ 23. 06. 2015.)
- [8] http://www.grf.bg.ac.rs/p/learning/predavanje_6_1415602301307.pdf, (приступ 20. 06. 2017.)
- [9] http://www.grf.bg.ac.rs/p/learning/p9_2015_16_re_etkasti_nosa_i_1450210452993.pdf, (приступ 1. 07. 2017.)
- [10] http://rc5.gaf.ni.ac.rs/dec/mehanika/homes/mehanika/Otpornost%20materijala%20I%20Gradjevinarstvo/Tabliceprofila_EC.pdf, (приступ 4. 07. 2017.)
- [11] https://d2t1xqejoj9utc.cloudfront.net/files/46339/generative_part_structural_analysis.pdf?1414421614, (приступ 13. 07. 2017.)
- [12] Николић Р., Вељковић Ј., Марјановић В., Металне конструкције-збирка решених задатака, Факултет инжењерских наука Крагујевац, 2013.
- [13] Николић Р., Марјановић В., Металне конструкције-приручник за прорачуне, Машински факултет, Крагујевац, 1998.