

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Машинске конструкције и механизација

Предмет: Компјутерска анализа конструкција

Број индекса: 329/2017

Лука С. Петровић

Пројектовање конзолних регала у складу са ФЕМ прописима

Мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Доцент др Родољуб Вујанац - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог мастер рада кандидат треба да опише поступак пројектовања конзолних регала према ФЕМ прописима. Потребно је извршити прорачун и избор главних елемената конзолног регала као и проверу нумеричком анализом.

Препоручена литература:

- [1] FEM 10.2.09: *Racking and shelving product group, The Design Of Cantillever Racking*, Section X of the Federation Europeenne de la Manutention, June, 2015.
- [2] ЕВРОКОД 3: ПРОРАЧУН ЧЕЛИЧНИХ КОНСТРУКЦИЈА, ДЕО 1-1: *Опита правила и правила за прорачун зграда, ДЕО 1-3: Опита правила, Додатна правила за хладно обликоване танкозидне елементе и лимове, ДЕО 1-8: Прорачун веза*
- [3] БУЋЕВАЦ Д., МАРКОВИЋ З., БОГАВАЦ Д., ТОШИЋ Д.: *Металне конструкције - Основе прорачуна и конструисања*, Грађевински факултет Универзитета у Београду, Београд, 1999.

Крагујевац, 2019.

ментор:
Др Родољуб Вујанац, доцент

Садржај

1. Увод	1
2. Концепције конзолних регала	2
2.1 Дефиниције	2
2.2 Врсте конзолних регала	3
2.2.1 Неукрућени систем конзолног регала	4
2.2.2 Укрућени систем конзолног регала	4
2.3 Стуб	5
2.4 Конзола	6
2.4.1 Пуни носачи	6
2.4.2 Лимени носачи	7
2.5 База	8
3. Основе пројектовања	9
3.1 Дејства и гранична стања	9
3.1.1 Дејства	9
3.1.2 Гранична стања	12
3.2 Класификација попречног пресека	13
3.3 Материјал	16
3.3.1 Опште одредбе	16
3.3.2 Карактеристике материјала	16
3.3.3 Општа механичка својства материјала	16
3.3.4 Неиспитани челици	17
3.3.5 Хладно обликовани челици са негарантованим механичким карактеристикама	17
4. Прорачун носећих елемената конзолног регала	18
4.1 Прорачун стуба	18
4.1.1 Дејство нормалне силе	18
4.1.2 Прорачун отпорности попречних пресека на комбиновано дејство	19
4.1.3 Прорачун отпорности елемената на комбинована дејства	22
4.2 Прорачун конзоле	25
4.2.1 Прорачун отпорности попречних пресека	26
4.2.2 Прорачун отпорности на бочно торзионо извијање	30
4.3 Прорачун завртањске везе	32
4.3.1 Сила смицања по једном завртњу	33

4.3.2 Затезна сила	34
4.3.3 Носивост на смицање.....	34
4.3.4 Носивост на затезање.....	35
4.3.5 Правило распореда завртњева.....	35
4.4 Прорачун завареног споја.....	35
5. Препоруке ФЕМ прописа за складиштење терета	37
5.1 Зазори за удаљености између складишних јединица	37
5.2 Утицај крутости терета и његово постављање	38
5.2.1 Асиметрични крути терети.....	38
5.2.2 Савитљив терет са великим препустима.....	38
5.2.3 Савитљив терет без препуста	39
5.2.4 Крути терет	39
5.2.5 Симетрично оптерећење распоређено на три конзоле	39
5.3 Начини постављања терета на конзоле	40
6. Прорачун елемената конзолног регала	41
6.1 Материјал	42
6.2 Парцијални фактори сигурности	42
6.3 Класификација попречног пресека.....	42
6.3.1 Стуб	42
6.3.2 Конзола.....	43
6.4 Провера конзоле	44
6.5 Провера стуба	46
7. Развој методологије за аутоматски прорачун и генерисање модела конзолног регала	51
8. Напонско деформациона анализа конзолног регала.....	55
9. Закључак.....	60
ПРИЛОГ А: Технички цртеж склопа конзолног регала	61
Литература	62

Резиме

У оквиру овог мастер рада описана је примена конзолних регала у индустрији. Дате су опште дефиниције и опис главних елемената од којих се састоји конзолни регал: стуб, конзола, база, укрућења. Описане су основе пројектовања конзолних регала у складу са ФЕМ прописима. Дате су дефиниције дејстава и граничних стања у складу са Еврокодом и препоруке за правилно складиштење терета према ФЕМ пропису. Извршен је прорачун стуба и конзоле на конкретном примеру. Описана је методологија прорачуна конзолних регала која је развијена на основу Еврокодова и ФЕМ прописа. Као потврда прорачуна одрађена је нумеричка анализа напонско-деформационог стања помоћу методе коначних елемената у софтверском пакету *Autodesk Inventor*.

Кључне речи: конзола, регал, ФЕМ, пропис, Еврокод, стандард, пројектовање

Abstract

This master thesis describes the usage of cantilever racks in the industry. General definitions and description of the main elements of the cantilever racking are given: column, arm, base, stiffeners. The basics of design of the cantilever racking in accordance with FEM regulations are described. Definitions of actions and limit states in accordance with Eurocode and recommendations for proper storage according to FEM regulation are given. A column and arm calculation was performed on a specific example. The methodology of cantilever rack calculations, which was developed based on Eurocodes and FEM regulations is described. As a confirmation of the calculation, a numerical analysis of the stress-strain state was performed using the finite element method in the Autodesk Inventor software package.

Keywords: arm, racking, FEM, regulation, Eurocode, standard, designing

1. Увод

Земље Европске економске заједнице, пре више од 15 година, усаглашено су започеле један изузетан, дугорочан и револуционаран посао, да за веома широку област конструисања ураде комплетну серију нових и усклађених стандарда којима би се прецизирали јединствени услови пројектовања и грађења конструкција у будућој уједињеној Европи. Усвајањем ових докумената требало би да престане важност националних прописа, чак и оних земаља чији стандарди имају традицију дужу од једног века и који су били симбол машинског конструисања.

Стандардима Еврокодови, одређена су општа правила за прорачун конструкција, за свакодневну употребу у прорачуну конструкција у целини и њених саставних делова, како традиционалне, тако и иновационе природе. Неуобичајени начини грађења или прорачунски услови нису посебно обухваћени и пројектант у таквим случајевима треба да захтева допунска експертска разматрања.

На основу европских стандарда, проистекао је и FEM 10.2.09 (*Federation Europeene De La Manutention*) [1] пропис који одређује потребне принципе и захтеве који се примењују на све врсте конструкција конзолних регалних система, произведених од челичних елемената, намењених за складиштење терета, који на конструкцију делују претежно статичким оптерећењима. Овај пропис даје смернице за захтеве конструкције које нису дате у стандарду EN 1993. Он се може користити и за носеће структуре, где се елементи регала користе као главни елементи конструкције.

Са порастом броја складишта током индустријске револуције, технологија складиштења постала је напреднија. Предузећа су имала потребу за складиштењем све веће количине елемената, са бољом искоришћеношћу простора. Из тих потреба проистекла је између осталог и примена конзолних регала. Својом способношћу да складиште дуже и габаритније материјале на много једноставнији начин, конзолни регали су у многоме олакшали функцију складишта и повећали искоришћење простора.

Конзолни регали представљају системе носећих конструкција намењених за складиштење робе, који имају за циљ максимално искоришћење складишног капацитета и могућност лаког складиштења и приступа, првенствено робе великих и неправилних габарита, а ређе палетизованој роби.

Компоненте од којих се састоји један конзолни регал су:

- стубови,
- конзоле,
- базе,
- укрућења,
- елементи за везе и
- разни помоћни елементи.

Сваки произвођач развија свој тип конструкције конзолног регала. Конзолни регали се могу позиционирати у халама или на отвореном.

2. Концепције конзолних регала

Како су се јављале многобројне потребе тржишта за складиштењем терета великих дужина, тако су се развијале разне концепције конзолних регала.

2.1 Дефиниције

Елементи од којих се састоји конзолни регал дефинишу се на следећи начин:

- **Стуб**
Вертикални елемент на коме се налазе конзоле. Може бити једностран и двостран.
- **Конзола**
Део конструкције који је на једном крају повезан са стубом, попречно у односу на правац ходника. Може бити фиксирана или подесива у зависности од типа регала.
- **База**
Хоризонтални елемент који је повезан са вертикалним стубом и фиксиран је за подлогу.
- **Веза**
Представља начин повезивања конзоле са стубом, базе са стубом и базе са подлогом, као и осталих елемената међусобно.
- **Укрупњење**
Дијагонални и/или хоризонтални елементи који повезују стубове.
- **Једностран конзолни регал**
Регал са конзолама само на једној страни приказан је на слици 1 а).
- **Двостран конзолни регал**
Регал који има носаче са обе стране приказан је на слици 1 б).



а)



б)

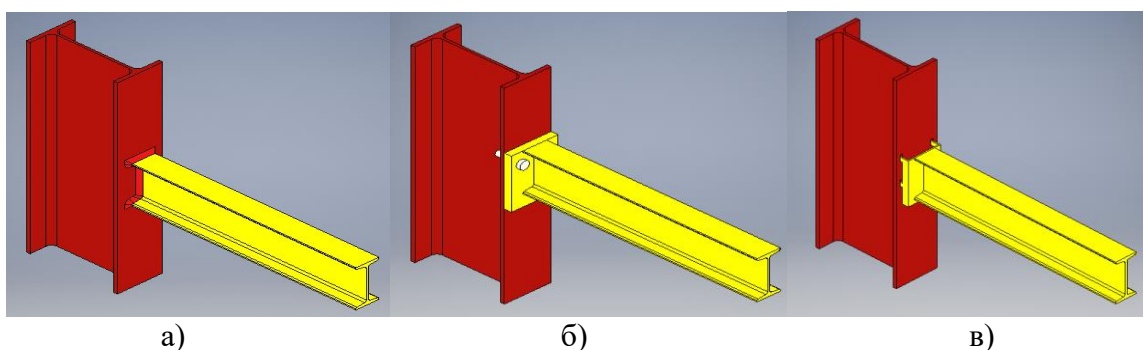
Слика 1 Конзолни регал: а) једностран и б) двостран

2.2 Врсте конзолних регала

Конзолни регали се праве најчешће од стандардних ваљаних профила пошто то поједностављује њихову израду. Праве се и од хладно обликованих профила, где им се значајно смањује маса али и носивост.

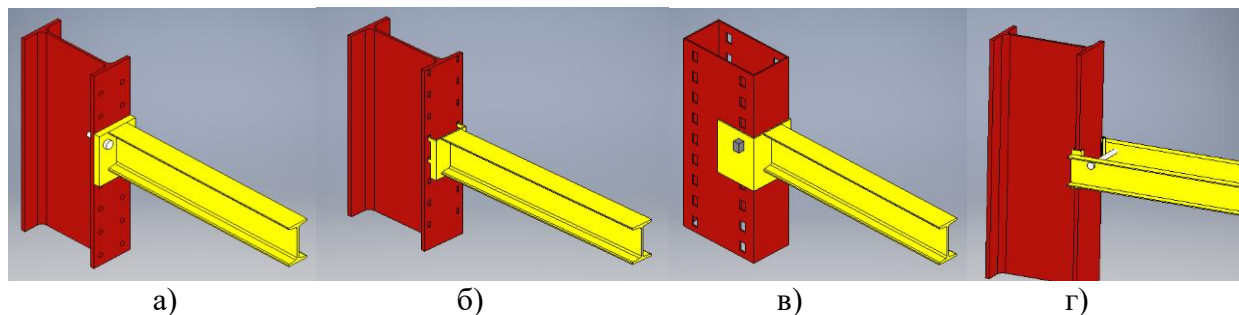
На основу типа везе између конзоле и стуба постоји неколико различитих врста конзолних регала који, иако су подвргнути истим правилима и методама конструисања, имају своје специфичне захтеве за прорачун [1]:

- Систем са неподесивом конзолом приказан је на слици 2 а), 2 б) и 2 в). Код ове врсте конструкције конзоле су обично заварене или причвршћене завртњевима, на већ дефинисаним растојањима и не могу се накнадно померати дуж стуба.



Слика 2 Систем са неподесивом конзолом: а) заварена конзола, б) конзола везана завртњевима и в) конзола закачена профилисаним кукицама

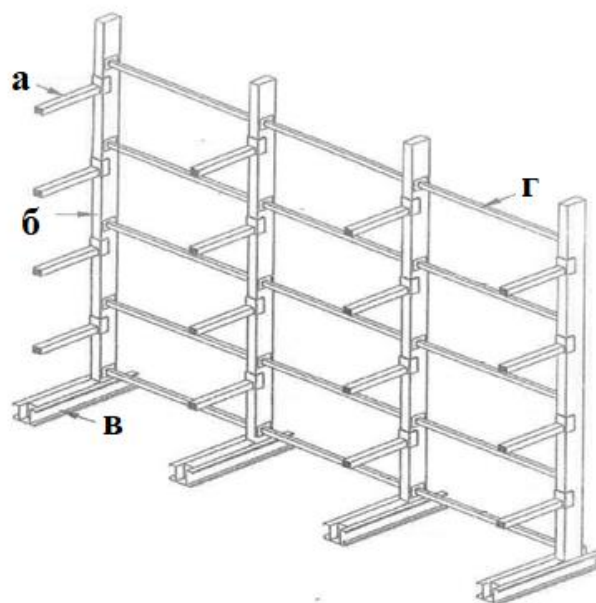
- Систем са подесивом конзолом приказан је на слици 3 а), 3 б), 3 в) и 3 г). Конзоле се у овој врсти конструкције могу померати дуж стуба за одређени корак, чија величина зависи од растојања између отвора на стубу.
 - Систем конзола везаних завртњевима приказан је на слици 3 а). Врста регала где је конзола причвршћена за стуб завртањском везом, а растојање између конзола је подесиво и зависи од размака између отвора на стубу. Стуб има неколико редова отвора између две конзоле.
 - Систем закачених конзола приказан је на слици 3 б). Врста конструкције у којој је конзола причвршћена за стуб помоћу кука за качење.
 - Систем конзола везаних клином приказан је на слици 3 в). Тип конструкције где је конзола везана за стуб помоћу спојног средства – клина.
 - Стезни систем конзола приказан је на слици 3 г). Тип подесивог конзолног система код кога се веза између конзоле и стуба остварује трењем. Због тога се конзола може налазити на било којој позицији на стубу.



Слика 3 Систем са подесивом конзолом: а) веза завртњима, б) веза кукицама, в) веза клином и г) стезни систем

2.2.1 Неукрућени систем конзолног регала

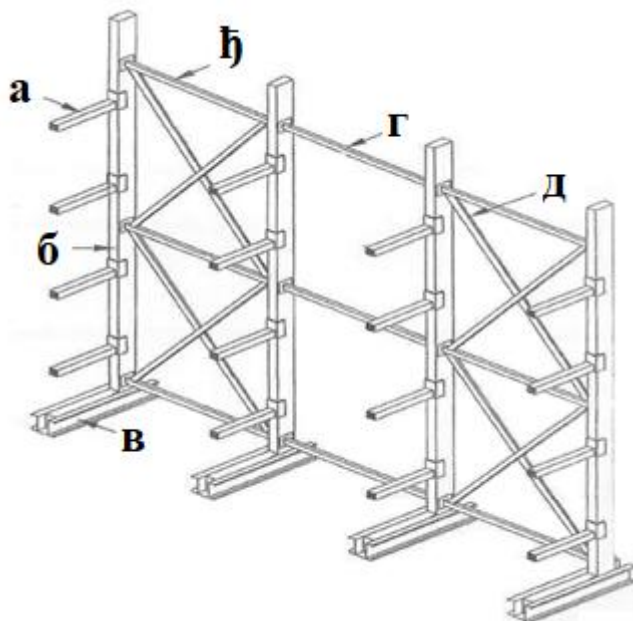
Конфигурација типичног неукрућеног конзолног регала је дата на слици 4, на којој се види да је стабилност у правцу ходника обезбеђена хоризонталним појасевима који повезују два стуба. У попречном правцу стабилност обезбеђују базе.



Слика 4 Неукрућени конзолни регал; (а) конзола, (б) стуб, (в) база, (г) хоризонтални појас [1]

2.2.2 Укрућени систем конзолног регала

Конфигурација типичног укрућеног конзолног регала је приказана на слици 5 на којој се види да је стабилност у правцу ходника обезбеђена унакрсним укрућењима. У попречном правцу, стабилност обезбеђују базе.

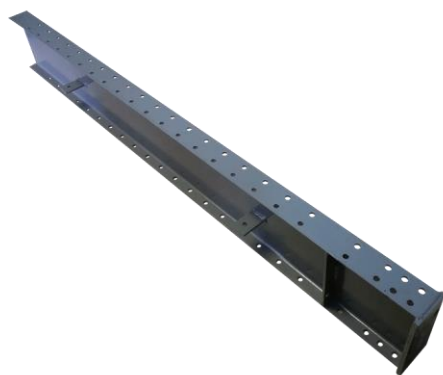


Слика 5 Укрупњени конзолни регал: (а) конзола, (б) стуб, (в) база, (г) хоризонтални појас, (д) дијагонални појас и (ђ) хоризонтални појас [1]

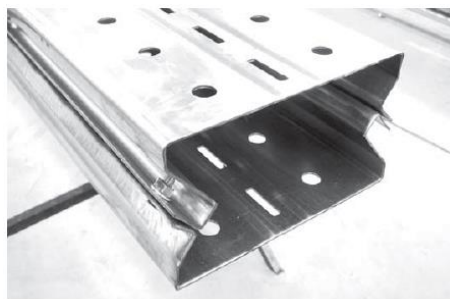
2.3 Стуб

Стубови представљају главне носеће елементе конзолног регала. Могу се израђивати од пуних челичних профила, слика 6 а), или од челичних лимова, слика 6 б), који су подвргнути хладном или топлим деформисању.

У зависности од начина споја између конзоле и стуба, стубови се перфорирају на одређени корак. Корак зависи од материјала који се складишти, димензије конзоле, као и од дозвољених геометријских промена на профилу.



а)



б)

Слика 6 Стуб конзолног регала: а) пун челични профил, б) профил од обликованог лима

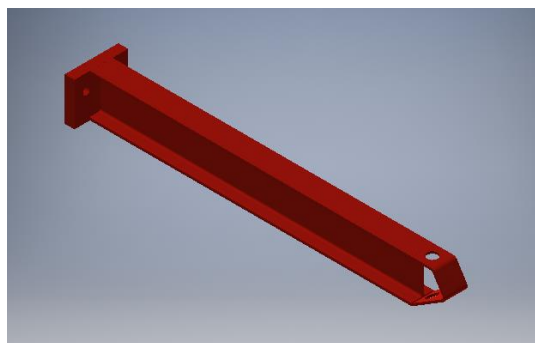
Стубови конзолног регала су елементи који су оптерећени истовремено притиском и моментом савијања. У пракси се јавља скоковита промена нормалне силе дуж стубова.

Реакције елемената које прихвата стуб су концентрисане силе и то у правцу осе стуба (вертикалне), па изазивају скоковиту промену нормалне силе.

2.4 Конзола

Код конструкције конзолних регала као носећи елемент се користи конзола приказана на слици 7 која је са стубом везана на различите начине, као што је дато у претходном поглављу. Конзоле су најчешће пуни носачи израђени од ваљаних I-профила са уским ножицама, односно најчешће су то IPN- профили и IPE- профили, а могу бити и пуни лимени носачи.

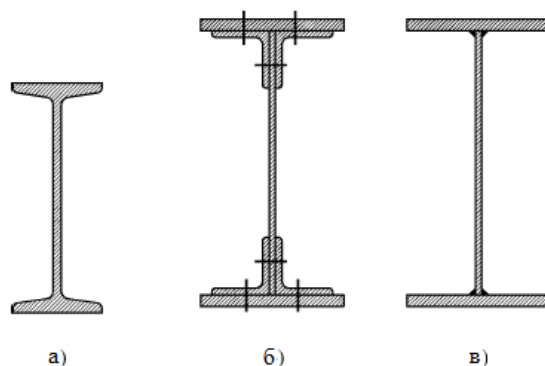
Носачи су елементи конструкције код којих савијање представља доминантан вид напрезања. Ови елементи под дејством спољашњег оптерећења подлежу савијању. Са становишта отпорности материјала, савијање носача може бити последица следећих случајева напрезања: чистог савијања, косог савијања и ексцентричног притиска или затезања.



Слика 7 Конзола

2.4.1 Пуни носачи

Као пуни носачи углавном се користе стандардни ваљани профили, слика 8 а) и профили формирани спајањем равних лимова помоћу прикључних угаоника и закивака, слика 8 б) или директним заваривањем слика 8 в) [2].

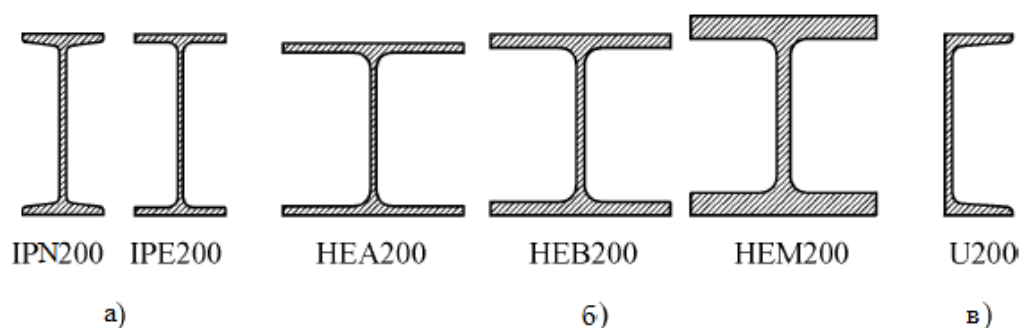


Слика 8 Различити облици попречних пресека пуних носача: а) ваљани I профил, б) пуни лимени носач у закованој изради и в) пуни лимени носач у завареној изради [2]

Предност ваљаних у односу на пуне лимене носаче огледа се, пре свега, у минимализацији радионичких захвата, па самим тим и трошкова. Међутим, ваљани профили имају већу тежину од еквивалентних лимених носача, чије се димензије могу ускладити уз оптимално искоришћење напона. Њихова већа јединична тежина је последица недовољно усавршене технологије ваљања. Наиме, технологија производње, то јест ваљања, условљава минималне дебљине ребра ваљаних профила, које би са становишта економичности, односно оптималног искоришћења пресека, требало да буду значајно мање. На тај начин, смањењем дебљине ребра смањује се и тежина носача уз незнатно смањење његове носивости, јер као што је познато, дебљина ребра веома мало утиче на вредност отпорног момента и момента инерције попречног пресека, па самим тим и на његову носивост и крутост. Овај недостатак на неки начин се компензује мањом јединичном ценом ваљаних профила. Од широке палете ваљаних профила најчешће се као носачи користе I-профили са уским, слика 9 а) или широким ножицама, слика 9 б) и ређе U-профил приказан на слици 9 в).

Као што је већ речено, за конзолне регале се од ваљаних профила најчешће користе IPN- профили са уским ножицама и IPE-профили.

Примена ваљаних профила са широким ножицама (HEA, HEB и HEM) препоручује се када је носач изложен косом савијању, затим, када носач није бочно придржан и када је ограничена грађевинска висина. Пожељно је користити HEA и HEB профиле, док HEM-профиле треба избегавати због њихове велике тежине. У поређењу са I-профилима са уским ножицама ови профили захтевају мању конструктивну висину, али су знатно тежи [2].



Слика 9 Различити типови ваљаних профила који се користе као носачи: а) I-профили са уским ножицама (IPN и IPE), б) I-профили са широким ножицама (HEA, HEB и HEM) и в) U-профили [2]

2.4.2 Лимени носачи

У зависности од начина на који се спајају лимови, деле се на заковане носаче и носаче у завареној изради. Некада су се користили искључиво заковани лимени носачи, док се данас претежно користе носачи завареног типа. За израду конзола конзолних регала користе се заварени лимени носачи.

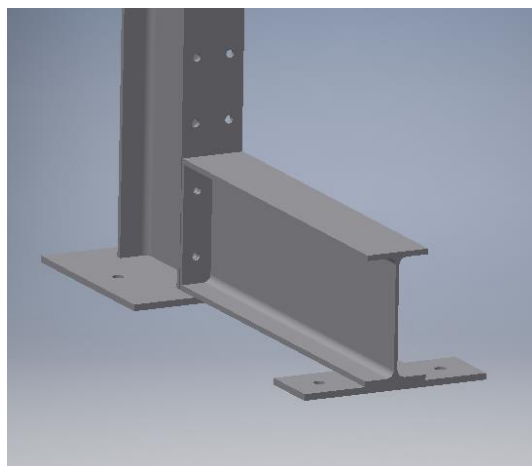
Пуни лимени носачи се користе када су распони и оптерећења толико велики да је исцрпљена носивост ојачаних ваљаних профила, али и у свим другим случајевима када њихова примена има економску оправданост. Они имају низ предности у односу на ваљане профиле, а то су пре свега [2]:

- мања тежина,
- слобода у избору облика и димензија попречног пресека,
- савлађивање великих распона и оптерећења,
- могућност израде носача променљиве висине,
- могућност покривања дијаграма момента,
- могућност оптимизације попречног пресека.

Пуни лимени носачи имају нешто већу јединичну цену од ваљаних, што је последица већег обима радова неопходних за њихову израду. Повезивање челичних лимова у целину и формирање јединственог попречног пресека захтева додатне радионичке операције (сечење, савијање, заваривање, закивање), па самим тим и трошкове. Међутим, имајући у виду горе наведене предности, а посебно мањи утрошак материјала, пуни лимени носачи у великом броју случајева представљају најекономичније решење, па стога и имају веома велику примену у зградарству, а нарочито у мостоградњи.

2.5 База

База, приказана на слици 10, представља елемент конзолног регала који служи за додатно фиксирање стуба за подлогу, као и за складиштење терета. Најчешће се израђује од истог профила као и стуб, међутим могуће је израдити је и од већег профила него што је стуб, како би се постигла додатна сигурност.



Слика 10 База конзолног регала

Приликом пројектовања базе није потребно вршити накнадне прорачуне, јер не трпи значајна оптерећења. Оно што је битно за пројектовање јесте прорачун везе између базе и подлоге. У ту везу спадају спојна средства као што су анкер завртњеве, као и плоче базе.

3. Основе пројектовања

Прорачун конструкције конзолног регала или његових делова врши се најчешће помоћу аналитичке или нумеричке методе, а за што бољу слику понашања конструкције неретко се користе и експерименталне методе.

3.1 Дејства и гранична стања

Еврокод 3 се, као и сви савремени прописи из области металних конструкција, заснива на полупробабистичком концепту прорачуна, односно на концепту граничних стања. Поузданост конструкције се доказује на основу методе парцијалних коефицијената сигурности. Вредности парцијалних коефицијената сигурности се одређују, или на основу дугогодишње успешне традиције пројектовања и грађења, или на основу статистичког вредновања и пробабистичке теорије поузданости из услова да је вероватноћа отказа конструкције мања од прописане вредности [3].

Према томе, конструкција треба да буде пројектована и изведена тако да са прихватљивом вероватноћом остане подобна за намењену употребу, узимајући у обзир њен предвиђен век трајања и коштање. Она треба да са одговарајућим степеном поузданости издржи сва дејства и друге утицаје, чија се појава очекује током извођења и експлоатације, и да има одговарајућу трајност. У случају експлозија, удара или последица грешака изазваних људским фактором, оштећења конструкције треба да буду сразмерна узроку који их је изазвао.

3.1.1 Дејства

Основу концепта прорачуна помоћу парцијалних коефицијената сигурности који је заступљен у Еврокоду чине прорачунске вредности. То су вредности које се добијају множењем (у случају дејстава) или дељењем (у случају својстава материјала или отпорности) карактеристичних, односно репрезентативних вредности одговарајућим парцијалним коефицијентима сигурности.

Појам оптерећења је у Еврокоду проширен употребом термина дејство (F) којим се обухватају, [4]:

- *директна* дејства, односно оптерећења која директно делују на конструкцију (на пример гравитационо оптерећење, снег, ветар итд.) и
- *индиректна* дејства, под којим се подразумевају принудне деформације које настају, на пример, услед температурних промена или различитих слегања ослонаца.

Дејства се, такође, могу поделити и према променљивости у простору на *фиксна*, која не мењају свој положај и правац деловања (нпр. сопствена тежина) и *слободна*, која могу да мењају интензитет и место деловања (нпр. покретна корисна оптерећења, оптерећења од ветра, снега, возила итд.).

Према својој природи дејства се деле на: *статичка*, која не изазивају значајно убрзање конструкције или конструкцијских елемената и *динамичка*, која изазивају значајно убрзање конструкције или неких њених елемената. У многим случајевима динамички

утицаји од дејства могу се срачунати из квази - статичких дејстава повећањем интензитета статичких дејстава или увођењем еквивалентног статичког дејства.

Прорачунске вредности дејстава (F_d), у општем облику, могу да се одреде на основу следећег израза [2]:

$$F_d = \gamma_F \cdot F_{rep} \quad (3.1)$$

где су:

F_{rep} - репрезентативна вредност одговарајућег дејства,

γ_F - парцијални коефицијент сигурности за разматрано дејство.

Нумеричке вредности најважнијих парцијалних коефицијената сигурности за дејства, које су препоручене у Еврокоду 1 за уобичајене конструкције у зградарству, приказане су у табели 1.

Табела 1 Парцијални коефицијенти сигурности за дејства - гранична стања носивости [2]

Гранично стање носивости	Дејства		Ознаке	Прорачунске ситуације	
				Сталне и пролазне	Инцидентне
Губитак статичне равнотеже конструкције или њеног дела	Стална	Неповољна	$\gamma_{G,sup}$	1,10	1,00
		Повољна	$\gamma_{G,inf}$	0,90	1,00
	Променљива	Неповољна	γ_Q	1,50	1,00
		Повољна		0,00	0,00
	Инцидентна		γ_A	-	1,00
Губитак носивости конструкције или њених делова изазван ломом или прекомерним деформацијама	Стална	Неповољна	$\gamma_{G,sup}$	1,35	1,00
		Повољна	$\gamma_{G,inf}$	1,00	1,00
	Променљива	Неповољна	γ_Q	1,50	1,00
		Повољна		0,00	0,00
	Инцидентна		γ_A	-	1,00

Према променљивости у току времена дејства се могу поделити на:

- *стална* дејства (G), која делују стално, или током највећег периода животног века објекта (сопствена тежина конструкције, тежина неконструктивних елемената, тежина инсталација и фиксне опреме),
- *променљива* дејства (Q), као што су корисна оптерећења, оптерећења од ветра и снега, која се повремено, али често појављују,
- *инцидентна* (изузетна) дејства (A), као што су, на пример, пожар, експлозије и удари, која се јављају веома ретко, само у изузетним случајевима и
- *сеизмичка* дејства (A_E) која настају приликом земљотреса.

3.1.1.1 Стална дејства

Стална дејства (G) су дејства код којих је промена вредности у односу на средњу вредност, зависно од времена, занемарљиво мала, [1]. У ову групу дејстава спадају:

- а) сопствена тежина конструкције укључујући зидове, подове, таванице, степенице и непокретну помоћну опрему коју носи конструкција регала (осим у изузетним случајевима кад је део конструкције присутан само у току грађења),
- б) тежина неносивих елемената (електричне инсталације, инсталације грејања, вентилација, системи за климатизацију и водоводне инсталације које носе елементи регалне конструкције),
- в) деформације настале као последица начина грађења,
- г) утицаји настали од слегања ослонаца,
- д) силе које настају од преднапрезања,
- ђ) деформације настале услед заваривања.

Карактеристичне вредности сталних дејстава најчешће могу да се одреде једноставно и са задовољавајућом тачношћу, на основу геометријских података и запреминске тежине материјала. При одређивању сталног оптерећења за потребе пројектовања потребно је користити стварне тежине материјала и конструкција, а у недостатку прецизних информација, утврђују се вредности од стране компететних јавних органа.

У случају да је сопствена тежина конструкције мања од 5% укупног вертикалног оптерећења, сопствена тежина конструкције се може занемарити.

3.1.1.2 Променљива дејства

Променљива дејства су она дејства која, по правилу, не трају све време постојања конструкције или чије промене вредности у времену знатно одступају од њихове средње вредности, [5]. У ту групу спадају:

- а) корисно оптерећење (терет који се складишти),
- б) сопствена тежина делова конструкције присутних само у току грађења (монтаже, на пример, скела),
- в) силе изазване променама температуре,
- г) покретна оптерећења,
- д) сви терети и споредна деловања изазвана њиховим утицајем,
- ђ) ветар,
- е) снег,
- ж) лед.

3.1.1.3 Дејства услед имперфекција

При анализи конструкција треба предузети одговарајуће мере да би се обухватили утицаји имперфекција, укључујући заостале напоне и геометријеске имперфекције, као што су одступање од вертикалности, одступање од правца, одступање од равности и грешке у

извођењу као и било које мање ексцентричности веза код неоптерећене конструкције. Следеће имперфекције треба узети у обзир, [1], [4]:

- имперфекције стубова,
- имперфекције укрућења,
- имперфекције за појединачне елементе.

Имперфекције стубова треба узети у обзир приликом глобалне анализе структуре регала. Резултујуће силе и моменте треба користити приликом прорачуна носећих елемената структуре.

Имперфекције укрућења треба узети у обзир при анализи било ког склопа који садржи елементе укрућења. Резултујуће силе и моменте треба користити приликом прорачуна одговарајућих елемената структуре.

3.1.1.4 Инцидентна дејства

При пројектовању носећих елемената складишних система треба испоштовати прописе за употребу и оптерећења која подразумевају неувобичајене вибрационе и динамичке силе.

Ударна оштећења регала коју узрокују виљушкар или друга транспортно-манипулативна средства за опслуживање регала могу се избећи захваљујући одговарајућим мерама безбедности.

3.1.2 Гранична стања

Гранична стања, која представљају основ за прорачун свих полупробабистичких метода, су стања конструкција чијим достизањем или прекорачењем конструкција губи своја основна својства и није више у стању да одговори прорачунским захтевима. Другим речима, достизањем ових стања, конструкција губи функцију за коју је била намењена. Гранична стања се могу поделити на [2]:

- гранична стања носивости и
- гранична стања употребљивости.

3.1.2.1 Гранична стања носивости

Гранична стања носивости се, као што и сам назив каже, односе на носивост конструкције или њених делова и везана су за рушење или за неке друге видове губитка носивости. Достизањем ових граничних стања директно се угрожава безбедност људи и изазивају велике материјалне штете. По облику губитка носивости она могу да се сврстају у две суштински различите групе.

Разликују се гранична стања која су проузрокована:

- губитком равнотеже конструкције или неког њеног дела, посматраног као круто тело (на пример претурање, клизање, итд.) и

- губитком носивости услед прекомерне деформације, лома или губитка стабилности конструкције или неког њеног дела, укључујући ослонце и темеље.

3.1.2.2 Гранична стања употребљивости

Гранична стања употребљивости су стања чијим достизањем или прекорачењем конструкција губи нека суштинска функционална својства. Конструкција губи своју функцију када њено понашање није у складу са прописаним експлоатационим критеријумима понашања, а да при том ни једно гранично стање носивости не мора да буде достигнуто. Захтеви употребљивости односе се на функционисање грађевинских објеката или њихових делова, удобност корисника (људи) и изглед.

Код уобичајених конструкција у зградарству, гранична стања употребљивости могу да настану услед:

- деформација или угиба који неповољно утичу на изглед или ефикасну експлоатацију грађевинског објекта (укључујући исправно функционисање машина или опреме), или изазивају оштећења завршних или неконструктивних елемената;
- вибрација које изазивају нелагодност код људи, оштећења зграде или њеног садржаја, или ограничавају њено ефикасно функционисање.

3.2 Класификација попречног пресека

Једна од основних поставки на којима се заснива читава концепција прорачуна граничних стања носивости челичних конструкција према Еврокоду 3 је подела попречних пресека на класе. Појам класе попречног пресека представља једну од битних новина које се собом доноси Еврокод 3. При провери граничних стања носивости челичних конструкција неопходно је одредити класе попречних пресека свих елемената конструкције.

Основни критеријум за класификацију попречних пресека је његова компактност која зависи од односа дужина/дебљина зидова попречног пресека (ножица и ребара), као и од начина напрезања и врсте челика. Значај коректног одређивања класе попречног пресека може се увидети ако се има у виду да од класе попречног пресека зависи:

- избор глобалне анализе конструкције (еластична или пластична),
- избор критеријума за прорачун отпорности попречног пресека и
- избор критеријума за проверу отпорности елемената као целине.

Еврокод 3 дефинише четири различите класе попречних пресека [5]:

Класа 1 - компактни (масивни) попречни пресеци који могу да развију момент пуне пластичне отпорности (M_{pl}) и који поседују значајан капацитет ротације, који је неопходан за пластичну глобалну анализу конструкције;

Класа 2 - компактни (масивни) попречни пресеци у којима може бити достигнут момент пуне пластичности (M_{pl}), али који поседују само ограничен капацитет ротације, који није довољан за пластичну глобалну анализу;

Класа 3 - попречни пресеци у којима може бити достигнут само еластични момент отпорности (граница развлачења се достиже само у најудаљенијем влакну) без ризика од појаве локалног избочавања, док је даља пластификација попречног пресека онемогућена због појаве локалног избочавања;

Класа 4 - попречни пресеци са витким зидовима код којих се услед локалног избочавања зидова попречног пресека не може достићи момент еластичне отпорности, односно код којих долази до локалног избочавања притиснутих зидова пре достизања границе развлачења у најудаљенијим влакнима. Њихова отпорност се одређује на основу концепта ефективне ширине.

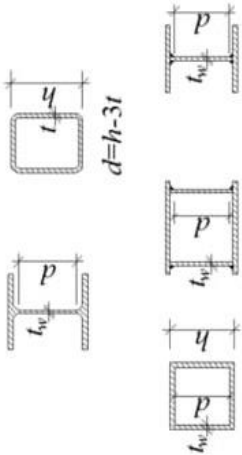
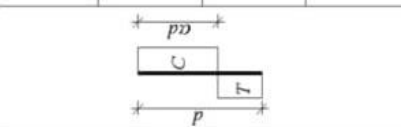
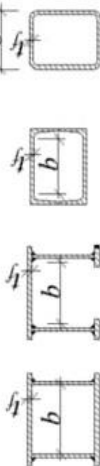
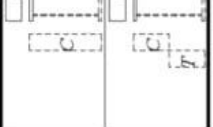
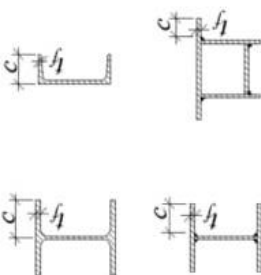
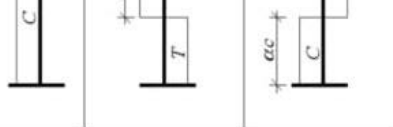
Како је већ поменуто, класа попречног пресека је условљена феноменом локалног избочавања притиснутих зидова попречног пресека, па стога зависи од свих чиниоца од којих зависи и отпорност на локално избочавање, а то су пре свега:

- виткост (однос дужина/дебљина) ножице или ребра,
- услови ослањања,
- начин напрезања и
- граница развлачења.

Према условима ослањања зидови попречног пресека могу се поделити на конзолне и унутрашње (обострано ослоњене). Као конзолни зидови третирају се ножице I, H или U-профила, као и конзолни препусти "шеширастих" пресека, док се унутрашњим сматрају ребра I, H, U, сандучастих или шупљих правоугаоних пресека, као и ножице "шеширастих", сандучастих и шупљих правоугаоних профила.

Од посебног значаја при одређивању класе попречног пресека је и начин напрезања, односно дијаграм нормалног напона у посматраном зиду попречног пресека (ножици или ребру) при достизању граничног стања носивости. Облик напонског дијаграма зависи од утицаја који на пресек делују (притисак, савијање или њихова комбинација) и врсте локалне анализе. Наиме, облици напонских дијаграма се битно разликују за случај пластичне и еластичне анализе пресека. Имајући у виду све наведене факторе од утицаја за одређивање класе попречног пресека, у оквиру табеле 2 дати су конкретни услови у виду максималних (граничних) односа ширина/дебљина, на основу којих може да се изврши класификација зидова (елемената) попречних пресека. Треба напоменути да елементи чије виткости не задовољавају услове за класу 3 припадају класи 4.

Табела 2 Максималне (граничне) виткости за поједине класе попречних пресека [3]

Елемент попречног пресека	Пластична отпорност		Еластична отпорност	
	Дијаграм напона	Класа 1	Класа 2	Класа 3
Ребра: Виткост d/t_w 		$\alpha=1$ 33ϵ	38ϵ	42ϵ
Унутрашње ножице Виткост b/t_f 		$\alpha>0,5$ $\frac{396\epsilon}{13\alpha-1}$	$\frac{456\epsilon}{13\alpha-1}$	$\frac{42\epsilon}{0,67+0,33\psi}$
Конзолне ножице Виткост c/t_f 		$\alpha=0,5$ 72ϵ	83ϵ	124ϵ
$\epsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$ f_y [MPa] ϵ	ϵ	$\frac{36\epsilon}{\alpha}$	$\frac{41,5\epsilon}{\alpha}$	$62\epsilon/(1-\psi)\sqrt{-\psi}$
Ако елемент не задовољава услов за класу 3 онда припада класи 4 V: Ваљани профили Z: Заварени профили H: Шупљи хладно обликовани профили				

3.3 Материјал

Веома је важно који материјал се користи за израду конзолних регала. Најчешће је то конструкциони челик S235 и S275.

3.3.1 Опште одредбе

Номиналне вредности материјала које су дате у овом поглављу треба да се усвоје као карактеристичне вредности за прорачунско пројектовање за производњу конзолних регала. Челици треба да су подобни за хладно обликовање, заваривање и галванизацију где је потребно.

Специфични челици према табелама из Еврокода 1993-1-1, чија су својства и хемијски састав у складу са релевантним стандардима, испуњавају захтеве овог поглавља [3].

Остали челици се могу користити уколико:

- њихова својства и хемијски састав су најмање еквивалентни челику, за које су стандарди наведени у табели из EN 1993-1-1 и EN 1993-1-3 [3].
- ако је челик за хладно обликовање, испуњава захтеве теста на савијање и однос карактеристичних вредности затезне чврстоће и границе развлачења задовољава вредност $f_u/f_y \geq 1,05$ где су f_u , f_y затезна чврстоћа и граница развлачења за основни материјал, респективно.

3.3.2 Карактеристике материјала

Номиналне вредности границе развлачења и затезне чврстоће конструкционог челика треба да су дате:

- по усвајању вредности $f_u=R_{eh}$ и $f_y=R_m$ директно из стандарда производа,
- користећи поједностављења дата у 3.3.4,
- користећи режим тестирања одређен у 3.3.5.

3.3.3 Општа механичка својства материјала

Општа механичка својства челика су:

- | | |
|--|--|
| - Модул еластичности | $E=210000 \text{ N/mm}^2$ |
| - Модул клизања | $G=E/[2(1+\nu)] \text{ N/mm}^2$ |
| - Поасонов коефицијент | $\nu=0,3$ |
| - Коефицијент линеарног термичког ширења | $\alpha=12 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ |
| - Густина | $\rho=7850 \text{ kg/m}^3$ |

3.3.4 Неиспитани челици

Следеће вредности f_{yb} треба усвојити уколико квалитет челика није дефинисан или основни материјал није испитан:

- Топло ваљани одсечци 200 N/mm²
- Остали челици 140 N/mm²

3.3.5 Хладно обликовани челици са негарантованим механичким карактеристикама

За челике у овој категорији може се користити низ испитивања затезања да би се оправдале вредности које се користе или се може користити нижа вредност границе развлачења.

4. Прорачун носећих елемената конзолног регала

Као што је већ напоменуто у претходним поглављима, главни носећи елементи конзолног регала јесу стуб и конзола и потребно их је адекватно прорачунати у складу са стандардима и прописима.

4.1 Прорачун стуба

Стуб је елемент конзолног регала на који делују спољашња оптерећења вертикалних сила и момената који се јављају у споју конзола са стубом.

4.1.1 Дејство нормалне силе

Често се у пракси јавља скоковита промена нормалне силе дуж стубова. Реакције елемената које прихвата стуб су концентрисане силе и то у правцу осе стуба (вертикалне), па изазивају скоковиту промену нормалне силе. Прорачун овако оптерећених штапова изводи се помоћу редуковане нормалне силе:

$$N_{c,Rd} = \sum_{i=1}^n N_{c,i} \cdot \alpha_i \quad (4.1)$$

где су:

$N_{c,i}$ - спољашња нормална сила притиска која делује у тачки i ,

α_i - фактор редукације који зависи од начина ослањања и односа h_i/l , табела 3,

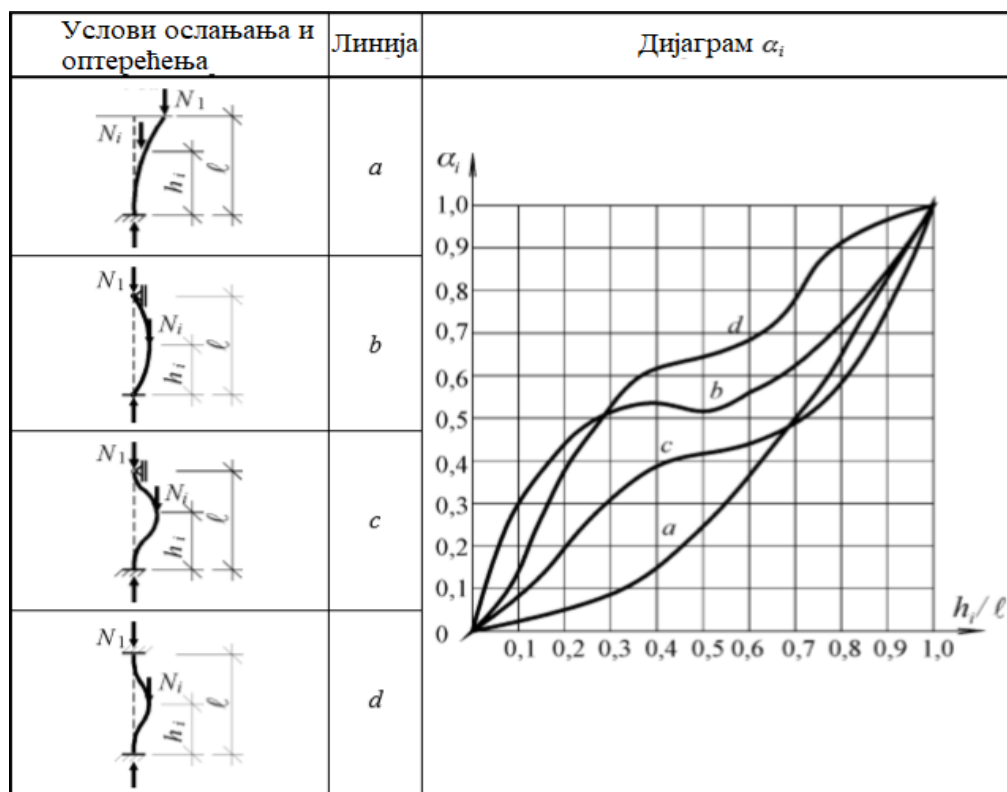
h_i - растојање између места деловања силе и непокретног ослоња,

l - дужина штапа.

Са овако одређеном силом $N_{c,Rd}$ доказ стабилности се спроводи уз претпоставку да је нормална сила константна дуж штапа и да има вредност $N_c = N_{c,Rd}$. Дужина извијања се одређује на основу услова ослањања према стандарду за одређивање дужина извијања штапова константног попречног пресека са константном нормалном силом.

Стубови конзолног регала су елементи који су оптерећени истовремено притиском и моментом савијања. Код елемената код којих се уз утицаје савијања (M и V) истовремено јављају и аксијалне силе затезања или притиска (N_t или N_c), потребно је, поред појединачних доказа граничних стања за аксијално оптерећене елементе и носаче, проверити и гранична стања носивости за комбиновано дејство ових утицаја, и то у погледу отпорности попречног пресека и отпорности елемента (само у случају аксијалне силе притиска).

Табела 3 Одређивање коефицијента дужине извијања α_i код штапова са скоковито променљивом нормалном силом [6]



У погледу знака аксијалне силе треба истаћи да, поред појединачних провера, у случају силе затезања треба проверити само отпорност попречних пресека на комбиновано дејство силе затезања и момента савијања, док у случају силе притиска треба извршити и контролу отпорности елемента као целине на комбиновано дејство утицаја.

4.1.2 Прорачун отпорности попречних пресека на комбиновано дејство

Прорачун отпорности попречних пресека на дејство комбинованих утицаја је идентичан за случај силе затезања и притиска. Поступак прорачуна зависи од класе попречног пресека. Код попречних пресека класе 1 и 2 се примењује пластичан, а код пресека класе 3 и 4 еластичан прорачун отпорности.

Када се примењује пластична анализа отпорности попречног пресека, Еврокод 3 прописује услове под којим се не мора вршити провера отпорности на комбиновано дејство момента савијања и аксијалне силе. Дакле, моментна отпорност попречних пресека класе 1 и 2 не треба да се редукује ако су задовољени следећи услови:

- за савијање I, H, ваљаних или заварених профила око јаче у-у осе инерције:

$$N_{sd} \leq \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{N_{pl,Rd}}{4} \\ \frac{N_{pl,w,Rd}}{2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{d \cdot t_w \cdot f_{yw}}{\gamma \cdot M_o} \end{array} \right. \quad (4.2)$$

- за савијање I, H, ваљаних или заварених профила око слабије z-z осе инерције:

$$N_{sd} \leq N_{pl,w,Rd} \quad (4.3)$$

где су:

$N_{pl,Rd}$ - пластична отпорност попречног пресека на затезање,

$N_{pl,w,Rd}$ - пластична отпорност ребра на затезање.

Ако претходни услов није задовољен, односно ако аксијална напрезања нису мала, прорачунска моментна отпорност попречног пресека треба да се редукује услед присуства аксијалних сила, па треба проверити следећи услов:

$$M_{sd} \leq M_{N,Rd} \quad (4.4)$$

где су:

M_{sd} - прорачунска вредност момента савијања,

$M_{N,Rd}$ - прорачунска вредност редуковане моментне отпорности из табеле 4.

Изрази на основу којих се може одредити редукована моментна отпорност $M_{N,Rd}$ приказани су у табели 4 за савијање око јаче (y-y) и слабије (z-z) осе инерције. У овој табели је дата и интеракциона формула за контролу отпорности попречних пресека изложених савијању око обе главне осе инерције (косо савијање).

Треба напоменути да изрази дати у табели 4 важе само у случају када је смичућа сила мала ($V_{sd} \leq 0,5 \cdot V_{pl,Rd}$), па се може занемарити њен утицај на редукацију момента отпорности. Ако то није случај, неопходно је да се при одређивању редуковане моментне отпорности попречног пресека ($M_{N,V,Rd}$) узму у обзир и аксијална и смичућа сила.

Код попречних пресека класе 3 и 4, код којих се отпорност попречних пресека одређује на основу еластичне анализе, потребно је да се испуни следећи услов:

$$\sigma_{x,Ed} \leq f_{yd} = f_y / \gamma_{M0} \quad (4.5)$$

где су:

$\sigma_{x,Ed}$ - прорачунска вредност максималног нормалног напона који се јавља у попречном пресеку, одређена на основу суперпозиције напона услед аксијалне силе и момената савијања,

f_{yd} - прорачунска вредност границе развлачења.

Табела 4 Редукована моментна отпорност попречног пресека $M_{N,Rd}$ [2]

	Тип попречног пресека	
	I и H, ваљани или заварени профили	Сандучасти и шупљи правоугаони профили
Савијање око јаче у-у осе инерције	$M_{y,Sd} \leq M_{Ny,Rd}$	
	$M_{Ny,Rd} = M_{pl,y,Rd} \frac{1-n}{1-0,5a} \leq M_{pl,y,Rd}$ или упрошћено за стандардне ваљане профиле $M_{Ny,Rd} = 1,11 \cdot M_{pl,y,Rd} \cdot (1-n) \leq M_{pl,y,Rd}$	$M_{Ny,Rd} = M_{pl,y,Rd} \frac{1-n}{1-0,5 \cdot a_w} \leq M_{pl,y,Rd}$ или упрошћено за стандардне ваљане профиле - за квадратне шупље профиле $M_{Ny,Rd} = 1,26 \cdot M_{pl,y,Rd} \cdot (1-n) \leq M_{pl,y,Rd}$ - за правоугаоне шупље профиле $M_{Ny,Rd} = 1,33 \cdot M_{pl,y,Rd} \cdot (1-n) \leq M_{pl,y,Rd}$
Савијање око слабије z-z осе инерције	$M_{z,Sd} \leq M_{Nz,Rd}$	
	за $n > a$: $M_{Nz,Rd} = M_{pl,z,Rd} \left[1 - \left(\frac{n-a}{1-a} \right)^2 \right]$ за $n \leq a$: $M_{Nz,Rd} = M_{pl,z,Rd}$ или упрошћено за стандардне ваљане профиле - за $n > 0,2$ $M_{Nz,Rd} = 1,56 \cdot M_{pl,z,Rd} \cdot (1-n) \cdot (n+0,6)$ - за $n \leq 0,2$ $M_{Nz,Rd} = M_{pl,z,Rd}$	$M_{Nz,Rd} = M_{pl,z,Rd} \frac{1-n}{1-0,5 \cdot a_f} \leq M_{pl,z,Rd}$ или упрошћено за стандардне ваљане профиле - за квадратне шупље профиле $M_{Nz,Rd} = 1,26 \cdot M_{pl,z,Rd} \cdot (1-n) \leq M_{pl,z,Rd}$ - за правоугаоне шупље профиле $M_{Nz,Rd} = M_{pl,z,Rd} \frac{1-n}{0,5 + h \cdot t / A} \leq M_{pl,z,Rd}$
Косо савијање	$\left[\frac{M_{y,Sd}}{M_{Ny,Rd}} \right]^\alpha + \left[\frac{M_{z,Sd}}{M_{Nz,Rd}} \right]^\beta \leq 1$ (може се усвојити на страни сигурности $\alpha=\beta=1$)	
	$\alpha=2 \quad \beta=5 \quad n \geq 1$	$\alpha = \beta = \frac{1,66}{1-1,13 \cdot n^2} \quad \text{и} \quad \alpha = \beta \leq 6$
$a = (A - 2 \cdot b \cdot t_f) / A \leq 0,5$ - за шупље профиле $n = N_{Sd} / N_{pl,Rd}$ $a_w = (A - 2 \cdot b \cdot t) / A \leq 0,5$ $M_{pl,y,Rd} = W_{pl,y} \cdot f_y / \gamma_{M0}$ $a_f = (A - 2 \cdot h \cdot t) / A \leq 0,5$ $M_{pl,z,Rd} = W_{pl,z} \cdot f_y / \gamma_{M0}$ - за сандучасте (заварене) профиле $a_w = (A - 2 \cdot b_f \cdot t_f) / A \leq 0,5$ $a_f = (A - 2 \cdot h \cdot t_w) / A$		

На основу претходног израза могу се добити интерактивне формуле за проверу отпорности попречних пресека класе 3 и 4 на комбиновано дејство момената савијања и аксијалне силе:

$$\frac{N_{Sd}}{A \cdot f_{yd}} + \frac{M_{y,Sd}}{W_{el,y} \cdot f_{yd}} + \frac{M_{z,Sd}}{W_{el,z} \cdot f_{yd}} \leq 1 \quad \text{за класу 3} \quad (4.6)$$

$$\frac{N_{Sd}}{A_{eff} \cdot f_{yd}} + \frac{M_{y,Sd} + N_{Sd} \cdot e_{Ny}}{W_{eff,y} \cdot f_{yd}} + \frac{M_{z,Sd} + N_{Sd} \cdot e_{Nz}}{W_{eff,z} \cdot f_{yd}} \leq 1 \quad \text{за класу 4} \quad (4.7)$$

где су:

A - површина попречног пресека,

A_{eff} - ефективна површина попречног пресека, када је изложен чистом притиску,

e_N - померање тежишне осе ефективног попречног пресека, одређеног на основу претпоставке да је попречни пресек изложен чистом притиску,

$W_{el,y}, W_{el,z}$ - еластични отпорни момент попречног пресека за одговарајућу осу инерције,

$W_{eff,y}, W_{eff,z}$ - еластични отпорни момент ефективног попречног пресека, одређеног за случај чистог савијања око посматране осе.

У случају савијања само око једне осе претходни изрази се такође могу користити, али се изоставља одговарајући члан (сабирак).

4.1.3 Прорачун отпорности елемената на комбинована дејства

Отпорност елемената на комбинована дејства се проверава само у случају деловања аксијалне силе притиска. Провера граничног стања носивости оваквих елемената се врши на основу интерактивних формула. Дата је читава серија интерактивних формула чија примена зависи од класе попречног пресека и могућности појаве бочно-торзионог извијања. За попречне пресеке класе 1 и 2 користи се пластична отпорност, за попречне пресеке класе 3 еластична, док се за попречне пресеке класе 4 користи еластична отпорност са карактеристикама ефективног попречног пресека.

У табели 5 дате су интерактивне формуле за проверу отпорности елемената на комбиновано дејство силе притиска и момената савијања око обе главне осе инерције.

Табела 5 Интерактивне формуле за проверу отпорности комбиновано оптерећених елемената [2]

Попречни пресеци класе 1 и 2	
Основни услов	$\frac{N_{Sd}}{\chi_{min} \cdot A \cdot f_y / \gamma_{M1}} + \frac{k_y \cdot M_{y,Sd}}{W_{pl,y} \cdot f_y / \gamma_{M1}} + \frac{k_z \cdot M_{z,Sd}}{W_{pl,z} \cdot f_y / \gamma_{M1}} \leq 1$
	$k_y = 1 - \frac{\mu_y \cdot N_{Sd}}{\chi_y \cdot A \cdot f_y} \leq 1,5; \mu_y = \bar{\lambda}_y(2 \cdot \beta_{M,y} - 4) + \frac{W_{pl,y} - W_{el,y}}{W_{el,y}} \leq 0,9$ $k_z = 1 - \frac{\mu_z \cdot N_{Sd}}{\chi_z \cdot A \cdot f_y} \leq 1,5; \mu_z = \bar{\lambda}_z(2 \cdot \beta_{M,z} - 4) + \frac{W_{pl,z} - W_{el,z}}{W_{el,z}} \leq 0,9$
Услов за торзионо осетљиве и бочно непридржане елементе	$\frac{N_{Sd}}{\chi_z \cdot A \cdot f_y / \gamma_{M1}} + \frac{k_{LT} \cdot M_{y,Sd}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_y / \gamma_{M1}} + \frac{k_z \cdot M_{z,Sd}}{W_{pl,z} \cdot f_y / \gamma_{M1}} \leq 1$
	$k_{LT} = 1 - \frac{\mu_{LT} \cdot N_{Sd}}{\chi_z \cdot A \cdot f_y} \leq 1,0; \mu_{LT} = 0,15 \cdot \bar{\lambda}_z \cdot \beta_{M,LT} - 0,15 \leq 0,9$ $k_z \text{ и } \mu_z \text{ као у основном услову}$
Попречни пресеци класе 3	
Основни услов	$\frac{N_{Sd}}{\chi_{min} \cdot A \cdot f_y / \gamma_{M1}} + \frac{k_y \cdot M_{y,Sd}}{W_{el,y} \cdot f_y / \gamma_{M1}} + \frac{k_z \cdot M_{z,Sd}}{W_{el,z} \cdot f_y / \gamma_{M1}} \leq 1$
	$k_y \text{ и } k_z \text{ као и код класе 1 и 2}$ $\mu_y = \bar{\lambda}_y(2 \cdot \beta_{M,y} - 4) \leq 0,9; \mu_z = \bar{\lambda}_z(2 \cdot \beta_{M,z} - 4) \leq 0,9$
Услов за торзионо осетљиве и бочно непридржане елементе	$\frac{N_{Sd}}{\chi_z \cdot A \cdot f_y / \gamma_{M1}} + \frac{k_{LT} \cdot M_{y,Sd}}{\chi_{LT} \cdot W_{el,y} \cdot f_y / \gamma_{M1}} + \frac{k_z \cdot M_{z,Sd}}{W_{el,z} \cdot f_y / \gamma_{M1}} \leq 1$
	$k_{LT} \text{ и } \mu_{LT} \text{ као и код класе 1 и 2}$ $k_z \text{ и } \mu_z \text{ као у основном услову}$
Попречни пресеци класе 4	
Основни услов	$\frac{N_{Sd}}{\chi_{min} \cdot A_{eff} \cdot f_y / \gamma_{M1}} + \frac{k_y \cdot (M_{y,Sd} + N_{Sd} \cdot e_{N,y})}{W_{eff,y} \cdot f_y / \gamma_{M1}} + \frac{k_z \cdot (M_{z,Sd} + N_{Sd} \cdot e_{N,z})}{W_{eff,z} \cdot f_y / \gamma_{M1}} \leq 1$
	$A_{eff}, W_{eff,y}, W_{eff,z} - \text{карактеристике ефективног попречног пресека}$ $k_y, k_z, \mu_y, \mu_z \text{ као код класе 3, али са каракт. ефективног пресека и увећаним моментом савијања } (M_{Sd} + N_{Sd} \cdot e_N)$
Услов за торзионо осетљиве и бочно непридржане елементе	$\frac{N_{Sd}}{\chi_z \cdot A_{eff} \cdot f_y / \gamma_{M1}} + \frac{k_y \cdot (M_{y,Sd} + N_{Sd} \cdot e_{N,y})}{\chi_{LT} \cdot W_{eff,y} \cdot f_y / \gamma_{M1}} + \frac{k_z \cdot (M_{z,Sd} + N_{Sd} \cdot e_{N,z})}{W_{eff,z} \cdot f_y / \gamma_{M1}} \leq 1$
	$k_z \text{ и } \mu_z \text{ као у основном услову}$ $k_{LT} \text{ и } \mu_{LT} \text{ као и код класе 1 и 2, али са карактеристикама ефективног попречног пресека}$

У случају када се савијање врши само око јаче осе ($M_{z,Sd}=0$), што се веома често јавља у пракси, интерактивне формуле треба модификовати. Тако на пример, за попречне пресеке класе 1 и 2, при једноосном савијању око јаче у-у осе, треба извршити следеће провере:

- за бочно придржане или торзионо неосетљиве елементе:

а) комбиновано дејство притиска за извијање и савијање око јаче осе према:

$$\frac{N_{Sd}}{\chi_y \cdot A \cdot f_y / \gamma_{M1}} + \frac{M_{y,Sd}}{W_{pl,y} \cdot f_y / \gamma_{M1}} \leq 1 \quad (4.8)$$

б) дејство притиска за извијање око слабије осе према:

$$\frac{N_{Sd}}{\chi_z \cdot A \cdot f_y / \gamma_{M1}} \leq 1 \quad (4.9)$$

- за бочно непридржане или торзионо осетљиве елементе треба проверити комбиновано дејство притиска за извијање и савијање око слабије осе према:

$$\frac{N_{Sd}}{\chi_z \cdot A \cdot f_y / \gamma_{M1}} + \frac{k_{LT} \cdot M_{y,Sd}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_y / \gamma_{M1}} \leq 1 \quad (4.10)$$

где су:

χ_y и χ_z - редукциони коефицијенти за посматрану осу извијања,

χ_{LT} - редукциони коефицијент за бочно-торзионо извијање,

k_y , k_{LT} - коефицијенти који су дати у оквиру табеле 5,

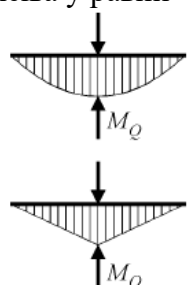
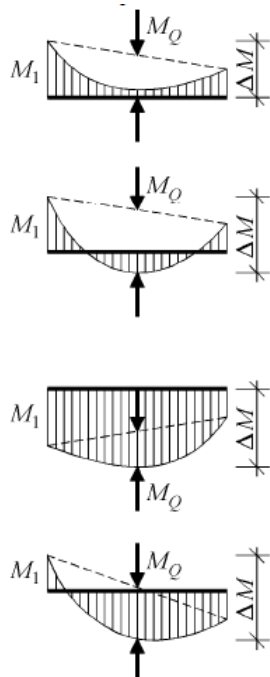
N_{Sd} и $M_{y,Sd}$ - прорачунске вредности утицаја.

На сличан начин треба извршити модификацију интеракционих формула датих у табели 6 за остале класе попречних пресека.

Коефицијенти еквивалентног униформног момента β_M зависе од облика моментног дијаграма и треба да се одреде на основу израза датих у оквиру табеле 6, водећи рачуна о правцу бочног придржавања:

- за $\beta_{M,y}$ (савијање око у-у осе) тачке бочног придржавања су у z-z правцу,
- за $\beta_{M,z}$ (савијање око z-z осе) тачке бочног придржавања су у у-у правцу,
- за $\beta_{M,LT}$ (савијање око у-у осе) тачке бочног придржавања су у у-у правцу.

Табела 6 Коефицијенти еквивалентног униформног момента [3]

Моментни дијаграм	Коефицијенти еквивалентног униформног момента β_M
Моменти на крајевима  $-1 \leq \psi \leq 1$	$\beta_{M\psi} = 1,8 - 0,7\psi$
Моменти услед попречних оптерећења у равни 	- за једнако подељено оптерећење $\beta_{MQ} = 1,3$ - за концентрисане $\beta_{MQ} = 1,4$
Моменти услед попречних оптерећења и момената на крајевима 	$\beta_M = \beta_{M\psi} + \frac{M_Q}{\Delta M} (\beta_{MQ} - \beta_{M\psi})$ $M_Q = \max M \text{ само услед попречног оптерећења}$ $\Delta M = \begin{cases} \max M & \text{за моментни дијаграм без промене знака} \\ \max M + \min M & \text{за моментни дијаграм са променом знака} \end{cases}$

4.2 Прорачун конзоле

Приликом прорачуна конзола, потребно је прво одредити број конзола на којима ће терет бити ослоњен и тежину терета поделити са добијеним бројем како би се видело ком оптерећењу је изложена свака конзола.

4.2.1 Прорачун отпорности попречних пресека

Код елемената оптерећених на савијање, као што су конзоле, доминантни статички утицаји су моменти савијања (M) и трансверзалне (смичуће) силе (V), па стога треба проверити отпорност попречних пресека на дејство ових утицаја. При томе треба доказати да ни у једном карактеристичном пресеку прорачунска вредност утицаја није већа од одговарајуће отпорности [2].

Доказ отпорности попречног пресека на дејство смичуће силе треба да се спроведе на следећи начин:

$$V_{Sd} \leq V_{pl,Rd} = A_v \cdot (f_y / \sqrt{3}) / \gamma_{M0} \quad (4.11)$$

где су:

V_{Sd} - прорачунска вредност смичуће силе у посматраном попречном пресеку,

$V_{pl,Rd}$ - прорачунска пластична отпорност попречног пресека на смицање,

A_v - површина смицања дата у оквиру табеле 7.

Површина смицања A_v зависи од типа попречног пресека и правца деловања смичуће силе. Упрошћено се може рећи да је то је сума површина свих делова попречног пресека који су паралелни са правцем деловања смичуће силе. За карактеристичне попречне пресека у табели 7 дати су изрази на основу којих се могу одредити површине смицања за оба правца смицања.

Уколико је ребро ослабљено рупама за механичка спојна средства, рупе не треба узимати у обзир при доказу смицања, ако је задовољен следећи услов:

$$A_{v,net} \geq (f_y / f_u) \cdot A_v \quad (4.12)$$

где је $A_{v,net}$ нето површина смицања. У супротном, отпорност на смицање треба да се одреди на основу редуковане површине смицања, која се одређује на основу следећег израза:

$$A_{v,red} \geq (f_y / f_u) \cdot A_{v,net} \quad (4.13)$$

У погледу момента савијања треба доказати да је у свим пресецима задовољен следећи услов [2]:

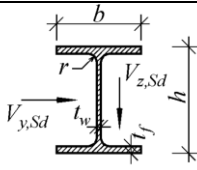
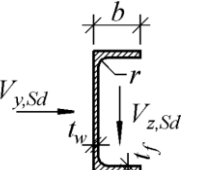
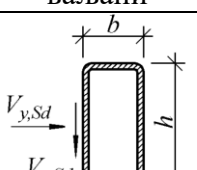
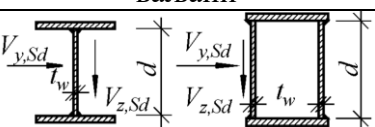
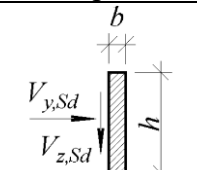
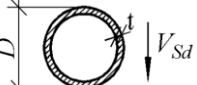
$$M_{Sd} \leq M_{c,Rd} \quad (4.14)$$

где су:

M_{Sd} - прорачунска вредност момента савијања у посматраном пресеку,

$M_{c,Rd}$ - прорачунски момент отпорности попречног пресека.

Табела 7 Површине смицања A_v

Тип попречног пресека	Површина смицања	
	$A_{v,z}$	$A_{v,y}$
 ваљани	$A - 2b \cdot t_f + (t_w + 2r) \cdot t_f$ или упростијено $1,04 \cdot h \cdot t_w$	$2 \cdot b \cdot t_f$
 ваљани	$A - 2b \cdot t_f + (t_w + r) \cdot t_f$	$2 \cdot b \cdot t_f$
 ваљани	$A \cdot h / (b + h)$	$A \cdot h / (b + h)$
 заварени	$\sum (d \cdot t_w)$	$A - \sum (d \cdot t_w)$
	A	
	$2A / \pi$	
A - Површина попречног пресека b - Ширина профила h - Висина профила d - Висина ребра		t_f - Дебљина ножице t_w - Дебљина ребра r - Полупречник заобљења ваљаних профила

Ако су смичуће силе занемарљиве ($V_{Sd} \leq 0,5 \cdot V_{pl,Rd}$), а попречни пресек није ослабљен рупама за спојна средства, прорачунски момент отпорности попречног пресека може се одредити на следећи начин [2]:

$$M_{c,Rd} = W_{pl} \cdot f_y / \gamma_{M0} \quad \text{за попречне пресеке класе 1 и 2} \quad (4.15)$$

$$M_{c,Rd} = W_{el} \cdot f_y / \gamma_{M0} \quad \text{за попречне пресеке класе 3} \quad (4.16)$$

$$M_{c,Rd} = W_{eff} \cdot f_y / \gamma_{M1} \quad \text{за попречне пресеке класе 4} \quad (4.17)$$

где су:

W_{pl} - пластични отпорни момент попречног пресека,

W_{el} - еластични отпорни момент попречног пресека,

W_{eff} - еластични отпорни момент ефективног попречног пресека,

γ_{M0} - парцијални коефицијент сигурности за отпорност поречних пресека класе 1, 2 и 3 дат у табели 8,

γ_{M1} - парцијални степен сигурности за отпорност поречних пресека класе 4 дат у табели 8

f_y - напон на граници развлачења дат у табели 9.

Када је попречни пресек ослабљен рупама за спојна средства, рупе на затегнутој ножици није потребно да се узимају у обзир, ако је задовољен следећи услов:

$$0,9 \cdot \frac{A_{f,net} \cdot f_y}{\gamma_{M2}} \geq \frac{A_f \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (4.18)$$

Уколико претходни услов није задовољен, рупе на затегнутој ножици не могу да се занемаре па је, код оваквих попречних пресека потребно проверити и следећи услов:

$$M_{Sd} \leq M_{u,Rd} = W_{net} \cdot f_y / \gamma_{M2} \quad (4.19)$$

где је $M_{u,Rd}$ прорачунска отпорност нето пресека на месту рупа за спојна средства, а W_{net} нето отпорни момент посматраног попречног пресека који је одређен на основу редуковане површине затегнуте ножице:

$$A_{f,red} = A_f \cdot \frac{f_y}{f_u} \cdot \frac{\gamma_{M2}}{0,9 \cdot \gamma_{M0}} \quad (4.20)$$

Код попречних пресека код којих се поред момента савијања јавља и значајна смичућа сила ($V_{Sd} > 0,5 \cdot V_{pl,Rd}$), прорачунски момент пластичне отпорности попречног пресека треба редуковати услед интерактивног дејства савијања и смицања. Код оваквих попречних пресека поред појединачних доказа отпорности на дејство момента савијања и смичуће силе потребно је и доказати да је $M_{Sd} \leq M_{V,Rd}$, где је $M_{V,Rd}$ редуковани прорачунски момент отпорности при дејству силе смицања, који за бисиметричне попречне пресеке (са једнаким ножицама), може да се одреди на основу следећег израза:

$$M_{v,Rd} = (W_{pl} - \frac{\rho \cdot A_v^2}{4 \cdot t_w}) \cdot f_y / \gamma_{M0}, \text{ при чему је } M_{V,Sd} \leq M_{c,Rd} \quad (4.21)$$

где је ρ коефицијент помоћу којег се изражава ниво смичућих напона:

$$\rho = (2 \cdot V_{Sd} / V_{pl,Rd} - 1)^2 \quad (4.22)$$

У осталим случајевима $M_{V,Rd}$ треба да се одреди као прорачунски момент пластичне отпорности попречног пресека, уз примену редуковане границе развлачења $f_{y,red} = (1 - \rho) \cdot f_y$ у зони смицања, односно на делу попречног пресека који представља површину смицања A_v .

Табела 8 Парцијални коефицијенти сигурности за отпорност γ_M [2]

Дефиниција		Симбол	Вредност
За основни материјал	Отпорност попречних пресека класе 1, 2 и 3	γ_{M0}	1,1
	Отпорност попречних пресека класе 4	γ_{M1}	1,1
	Отпорност елемената на губитак стабилности	γ_{M1}	1,1
	Отпорност нето пресека код рупа за завртњеве	γ_{M2}	1,25
За везе	Завртњеве	γ_{Mb}	1,25
	Закивци	γ_{Mr}	1,25
	Чепови	γ_{Mp}	1,25
	Шавови	γ_{Mw}	1,25
За везе-проклизавање	Гранично стање носивости	$\gamma_{Ms,ult}$	1,25
	Гранично стање носивости (предимензионисане и овалне рупе)	$\gamma_{Ms,ult}$	1,4
	Гранично стање употребљивости	$\gamma_{Ms,ser}$	1,1

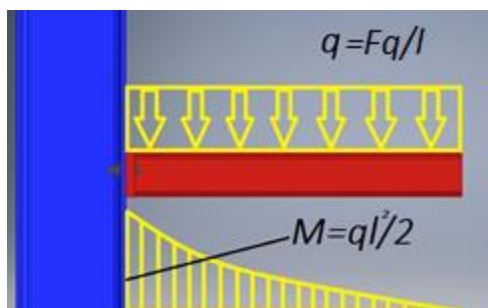
Табела 9 Номиналне вредности границе развлачења f_y и чврстоће на затезање f_u за конструкционе челике [2]

Ознака врсте челика		Дебљина t *)			
		$t \leq 40$ mm		$40 < t \leq 100$ mm **)	
Еврокод 3	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	355	490
*) t је номинална дебљина елемента					
**) 63 mm за плоче и остале равне производе од челика					

Веза између конзоле и стуба је остварена завртњевима и може се посматрати као крута, док се оптерећење конзоле може посматрати као континуално оптерећење, па се

прорачунска вредност момента савијања у посматраном пресеку M_{Sd} на основу слике 11 може израчунати на следећи начин [7]:

$$M_{Sd} = \frac{F_q \cdot l}{2} \cdot [1 - (z/l)]^2 \quad (4.23)$$



Слика 11 Максимални момент код конзоле

Пошто је максимални момент код конзоле, како је приказано и на слици 11, у укљештењу, то значи да је $z = 0$, па се добија:

$$M_{Sd} = \frac{F_q \cdot l}{2} \quad (4.24)$$

Ову вредност момента је потребно помножити одговарајућим коефицијентом сигурности за дејство:

$$M_{Sd} = \frac{F_q \cdot l}{2} \cdot \gamma_{G,sup} \quad (4.25)$$

где су:

q - континуално оптерећење,

F_q - сила која представља дејство континуалног оптерећења и делује на средини конзоле,

l - дужина конзоле,

$\gamma_{G,sup}$ - горња вредност парцијалног степена сигурности за стална дејства, дата у оквиру табеле 1.

4.2.2 Прорачун отпорности на бочно торзионо извијање

Код елемената који нису континуално бочно придржани и чија је торзиона крутост, као и крутост на савијање око слабије (бочне) главне осе инерције мала, потребно је да се спроведе контрола бочно-торзионог извијања, и то на следећи начин:

$$M_{Sd} \leq M_{b,Rd} \quad (4.26)$$

где је $M_{b,Rd}$ прорачунски момент отпорности елемента на бочно-торзионо извијање. Он може да се одреди на основу следећег израза:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot \beta_w \cdot W_{pl,y} \cdot f_y / \gamma_{M1} \quad (4.27)$$

где је χ_{LT} редукциони коефицијент за бочно-торзионо извијање, а β_w се одређује на следећи начин:

$$\beta_w = 1 \quad \text{за попречне пресеке класе 1 и 2} \quad (4.28)$$

$$\beta_w = W_{el,y} / W_{pl,y} \quad \text{за попречне пресеке класе 3} \quad (4.29)$$

$$\beta_w = W_{eff,y} / W_{pl,y} \quad \text{за попречне пресеке класе 4} \quad (4.30)$$

Редукциони коефицијент χ_{LT} се, у функцији бездимензионе виткости $\bar{\lambda}_{LT}$ одређује на основу истих кривих извијања као и бездимензиони коефицијент извијања код централно притиснутих штапова:

$$\chi_{LT} = \begin{cases} 1 & \text{за } \bar{\lambda} \leq 1 \\ \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \lambda_{LT}^2}} & \text{за } \bar{\lambda} > 1 \end{cases} \quad (4.31)$$

где је:

$$\phi_{LT} = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] \quad (4.32)$$

Вредности коефицијента имперфекције за бочно-торзионо извијање α_{LT} се одређују на основу табеле 10 и слике 12:

- за ваљане профиле на основу криве А ($\alpha_{LT} = 0,21$),
- за заварене профиле на основу криве С ($\alpha_{LT} = 0,49$).

Табела 10 Фактор имперфекције α_{LT} [2]

Крива извијања	A ₀	A	B	C	D
Фактор имперфекције α_{LT}	0,125	0,206	0,339	0,489	0,756

Бездимензиона виткост елемента на бочно-торзионо извијање $\bar{\lambda}_{LT}$ треба да се одреди на следећи начин:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{\beta_w \cdot W_{pl,y} \cdot f_y}{M_{cr}}} = \frac{\lambda_{LT}}{\lambda_1} \cdot \sqrt{\beta_w} \quad (4.33)$$

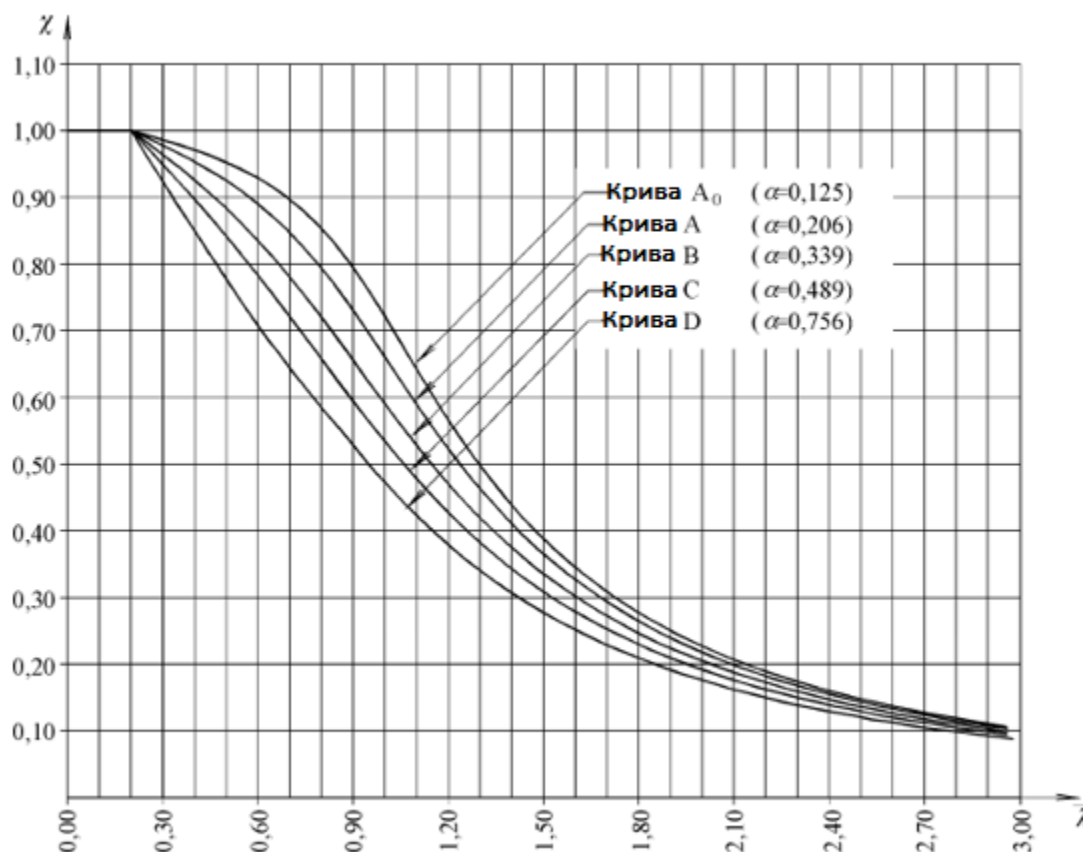
где су:

M_{cr} - критични момент према линеарно еластичној теорији бочно-торзионог извијања,

λ_1 - виткост на граници развлачења.

Виткост на граници развлачења се рачуна као:

$$\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{E/f_y} = 93,9 \cdot \varepsilon \quad (4.34)$$



Слика 12 Криве извијања [2]

Провера бочно-торзионог извијања није потребна код носача који су бочно придржани читавом својом дужином, код носача код којих је бездимензиона виткост на бочно-торзионо извијање мања од 0,4 ($\overline{\lambda}_{LT} \leq 0,4$), код носача који су изложени савијању око слабије осе инерције и код носача који су торзионо крути, односно неосетљиви на бочно-торзионо извијање (нпр. већина сандучастих носача).

4.3 Прорачун завртањске везе

Имајући у виду начин напрезања везе и понашање завртњева у њој, Еврокод 3 разликује пет категорија [2]:

Категорија А: Везе у смичућим спојевима, код којих завртњеви носе на смицање и притисак по омотачу рупе. У ову категорију спадају везе изведене са обичним завртњевима

(од нискоугљеничног челика) или високовредним завртњевима без силе преднапрезања;

Категорија Б: Везе у смичућим спојевима код којих завртњеви носе на трење, а које су отпорне на проклизавање при граничном стању употребљивости. То су везе са преднапрегнутим високовредним завртњевима са контролисаним притезањем. До проклизавања везе не сме да дође при сервисном (експлоатационом) оптерећењу.

Категорија В: Везе у смичућим спојевима код којих завртњеви носе на трење и које су отпорне на проклизавање при граничном стању носивости. Као и код категорије Б користе се преднапрегнути високовредни завртњеви, али се њихово проклизавање не дозвољава ни при граничном стању носивости;

Категорија Г: Везе оптерећене на затезање које су изведене помоћу непреднапрегнутих завртњева. Могу да се користе обични или високовредни завртњеви класе чврстоће 4.6 до 10.9. Примењују се код веза које нису изложене учесталим променама силе затезања, изузев ако промена оптерећења настаје услед уобичајеног оптерећења од ветра;

Категорија Д: Везе оптерећене на затезање остварене помоћу преднапрегнутих високовредних завртњева. За ову категорију веза могу да се примењују само високовредни завртњеви са контролисаним притезањем. Користе се за динамички оптерећене конструкције, јер преднапрезање побољшава отпорност завртњева на замор. Треба истаћи да код оваквих веза није потребан посебан третман контактних површина, изузев када су везе изложене истовременом дејству и смицања и затезања.

Веза између конзоле и стуба, као и базе и стуба је остварена завртњевима. За конзолу и базу је прво заварена плоча која омогућава повезивање ових елемената са стубом. Класе чврстоће завртњева су 8.8 или 10.9. У зависности од оптерећења, користе се 2 или 4 завртња.

Пошто је у овом случају завртањска веза оптерећена на комбинацију смицања и затезања, треба да буде задовољен следећи услов [8]:

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 \cdot F_{t,Rd}} \leq 1 \quad (4.35)$$

где су:

$F_{v,Ed}$ – сила смицања,

$F_{v,Rd}$ – носивост на смицање,

$F_{t,Ed}$ – затезна сила,

$F_{t,Rd}$ – носивост на затезање.

4.3.1 Сила смицања по једном завртњу

Како на завртањ делује смицајна сила, она се рачуна као:

$$F_{v,Ed} = \frac{F_q}{n} \cdot \gamma_{G,sup} \quad (4.36)$$

где су:

F_q - сила која представља дејство континуалног оптерећења и делује на средини конзоле,
 $\gamma_{G,sup}$ - горња вредност парцијалног степена сигурности за стална дејства, дата у оквиру табеле 1,
 n - број завртњева.

4.3.2 Затезна сила

Затезна сила која делује на завртањ настаје од дејства момента, и она се рачуна као:

$$F_{t,Ed} = \frac{M \cdot l_i}{\sum z_i \cdot l_i^2} \cdot \gamma_{G,sup} \quad (4.37)$$

Адекватан момент који делује на завртњеве се рачуна као:

$$M = F_q \cdot \left(\frac{l}{2} + b\right) \quad (4.38)$$

где су:

l_i - вертикална растојања од тачке превртања (рачуна се као четвртина висине профила конзоле – $a = h/4$),
 z_i - број завртњева у i -том реду,
 l - дужина конзоле,
 b - дебљина плоче за везу конзоле и стуба.

4.3.3 Носивост на смицање

Носивост на смицање се изражава преко:

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} \quad (4.39)$$

где је:

α_v - коефицијент који зависи од класе чврстоће (за класе 4.6, 5.6, 8.8, $\alpha_v = 0,6$, за класе 4.8, 5.8, 6.8, 10.9, $\alpha_v = 0,5$),
 f_{ub} - затезна чврстоћа завртња,
 A_s - површина испитног пресека завртња,
 γ_{M2} - отпорност нето пресека код рупа за завртње.

4.3.4 Носивост на затезање

Носивост на затезање се изражава преко израза:

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} \quad (4.40)$$

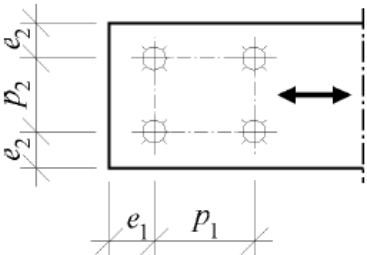
где је:

k_2 - коефицијент који зависи од облика главе завртња (за завртњеве са упуштеном главом $k_2 = 0,63$, за остале случајеве $k_2 = 0,9$).

4.3.5 Правило распореда завртњева

Еврокод 3 такође даје правила за конструисање веза са завртњевима у виду минималних и максималних вредности њихових међусобних (p_1 и p_2) и ивичних (e_1 и e_2) растојања у правцу и управно на правац деловања силе. Ова правила су дата у оквиру табеле 11 заједно са препорученим вредностима поменутих растојања.

Табела 11 Правила распореда завртњева [2]

 t – дебљина лима (плоче) d_0 - пречник рупе за завртањ	$1, 2d_0 \leq e_1 \leq \max \{12t; 150\text{mm}\}$ $1, 5d_0 \leq e_2 \leq \max \{12t; 150\text{mm}\}$ $2, 2d_0 \leq p_1 \leq \max \{14t; 150\text{mm}\}$ $3, 0d_0 \leq p_2 \leq \max \{14t; 150\text{mm}\}$			
	Препоручене вредности, mm			
	Завртањ	p_1 и p_2	e_1	e_2
	M12	40	30	25
	M16	55	40	30
	M20	70	50	40
	M24	80	60	50
	M27	90	70	55
	M30	100	75	60
	M36	120	90	70

4.4 Прорачун завареног споја

Еврокод 3 даје правила за конструисање и прорачун сучеоних шавова (са потпуном и делимичном пенетрацијом), угаоних шавова, шавова у рупи, чеп шавова и ужљебљених шавова. Свакако да највећу примену у носећим челичним конструкцијама имају сучеони и угаони шавови.

Код овакве изведбе конзолног регала, где се користи спајање завртањском везом, потребно је прорачунати заварени спој између чеоне плоче и конзоле, где су угаони шавови.

Прорачунска отпорност угаоног шави може се сматрати задовољавајућом ако је испуњен следећи услов:

$$F_{w,Sd} \leq F_{w,Rd} = \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w \cdot \gamma_{Mw}} \cdot a \cdot l \quad (4.41)$$

где су:

a - дебљина угаоног шави,

l - ефективна дужина угаоног шави,

f_u - чврстоћа основног материјала на затезање,

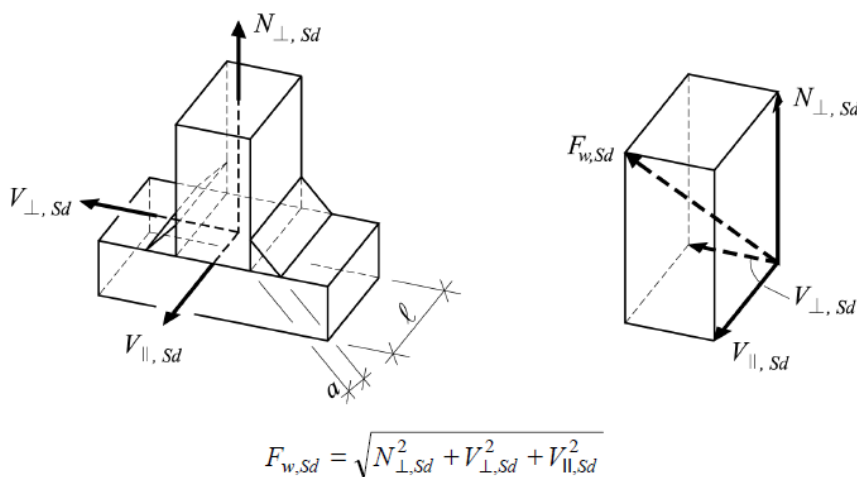
$F_{w,Sd}$ - резултанта свих сила које делују на посматрани шав са слике 13,

$F_{w,Rd}$ - прорачунска отпорност угаоног шави,

β_w - фактор корелације чија вредност зависи од врсте челика из табеле 12.

Табела 12 Фактор корелације β_w и отпорност угаоних шавова $F_{w,Rd}$ за различите дебљине шавова [2]

$\gamma_{Mw}=1,25$		$F_{w,Rd}$, kN								
a		3	4	5	6	7	8	9	10	12
Fe360	$\beta_w=0,80$	62,4	83,1	103,9	124,7	145,5	166,3	187	207,8	249,4
Fe430	$\beta_w=0,85$	70,1	93,5	116,8	140,2	163,6	186,9	210,3	233,7	280,4
Fe510	$\beta_w=0,90$	78,5	104,7	130,9	157	183,2	209,4	235,6	261,7	314,1
Вредности прорачунских отпорности су одређене за ефективну дужину $l=100$ mm. За друге дужине прорачунска отпорност може да се одреди множењем са $l/100$.										



Слика 13 Резултујућа сила у угаоном шаву

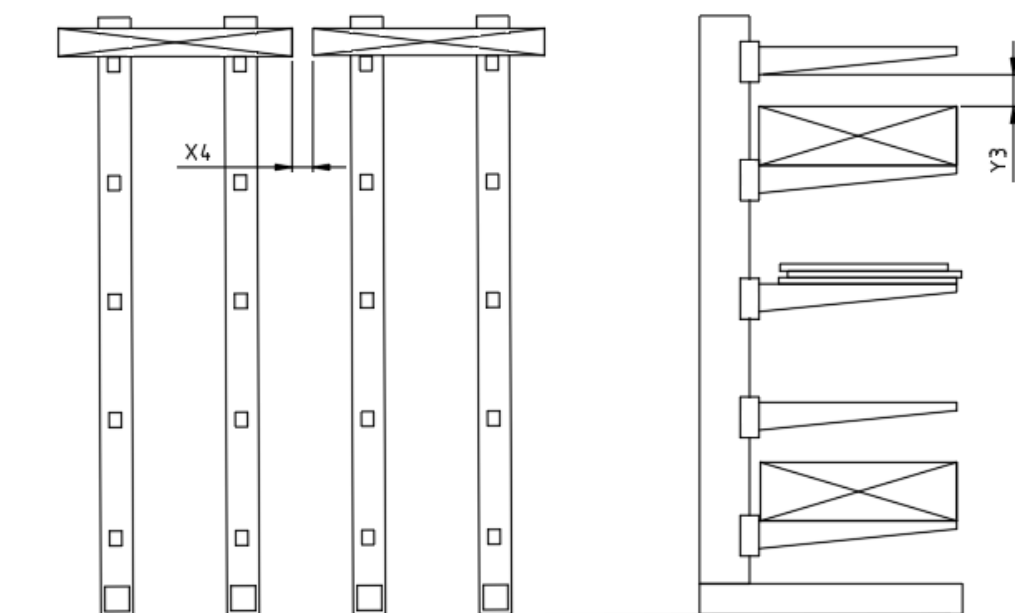
5. Препоруке ФЕМ прописа за складиштење терета

У оквиру ФЕМ прописа, дате су препоруке како је правилно складиштити терет на конзолама.

5.1 Зазори за удаљености између складишних јединица

Зазори се разматрају у односу на максималне димензије складишних јединица (укључујући и препусте). Максималне димензије складишне јединице одређује корисник или пројектант.

Вредности за хоризонталне и вертикалне зазоре не би требало да буду мање од вредности приказаних на слици 14 и у табели 13.



Слика 14 Хоризонтални и вертикални зазори између складишних јединица

Табела 13 Хоризонтални и вертикални зазори између складишних јединица [1]

Висина стуба Y_h (mm)	X_4 (mm) Јединично оптерећење до 3m	X_4 (mm) Јединично оптерећење од 3m до 6m	X_4 (mm) Јединично оптерећење преко 6m	Y_3 (mm)
3000	200	250	300	75
6000	250	300	350	100
9000	300	350	400	150
13000	400	450	500	200

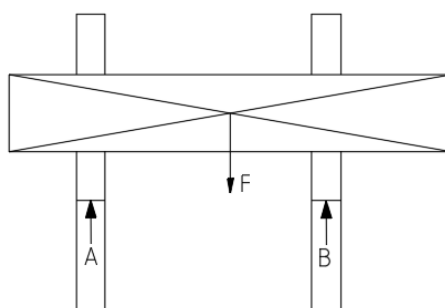
5.2 Утицај крутости терета и његово постављање

Како би терет био што равномерније и повољније постављен на конзолне регале, потребно је размотрити његову крутост.

5.2.1 Асиметрични крути терети

Асиметрично постављање терета приказано на слици 15 има за последицу неједнако оптерећење конзола (у овом случају конзола В је оптерећенија од конзоле А).

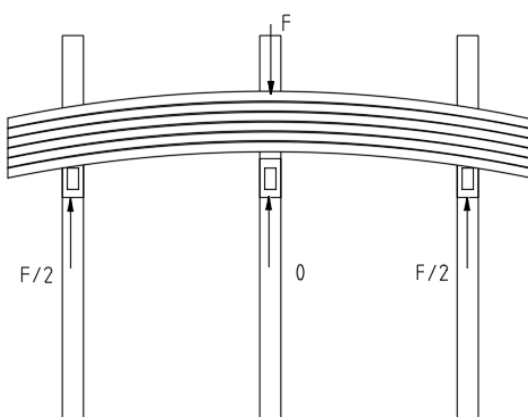
Треба обезбедити да центар масе не буде много померен у односу на осу симетрије, да не би дошло до превртања терета.



Слика 15 Асиметрично постављен терет

5.2.2 Савитљив терет са великим препустима

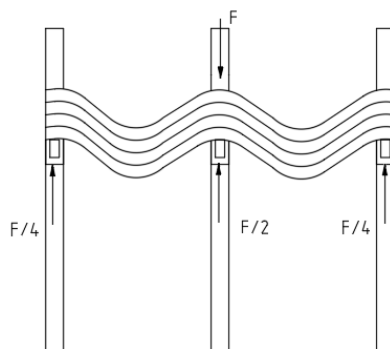
Савитљиви терет са великим препустима се може понашати као што је приказано на слици 16, приликом чега долази до оптерећења само крајњих конзола, док је средишна конзола неоптерећена.



Слика 16 Савитљив терет

5.2.3 Савитљив терет без препуста

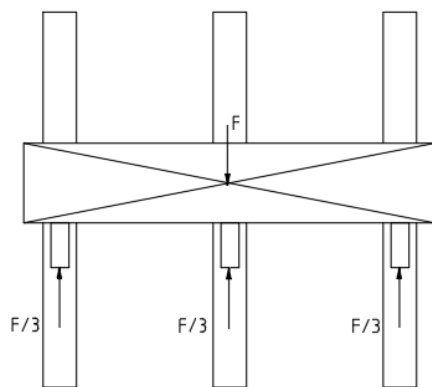
Савитљив терет без препуста се може понашати као што је приказано на слици 17, приликом чега долази до расподеле оптерећења на тај начин да крајње конзоле трпе 25% оптерећења, док средња конзола трпи 50% оптерећења.



Слика 17 Савитљив терет без препуста

5.2.4 Крути терет

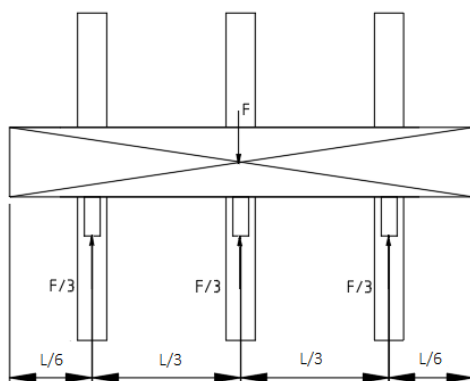
Крути терет без препуста се може понашати као што је дато на слици 18. Овде је оптерећење једнако распоређено на све три конзоле.



Слика 18 Крути терет

5.2.5 Симетрично оптерећење распоређено на три конзоле

Да би се добила подједнака оптерећења код регала где терет лежи на три конзоле треба користити конфигурацију дату на слици 19. Приликом складиштења крутих терета као што су машински алати, увек треба тежити подједнакој расподели оптерећења на све конзоле.



Слика 19 Крути терет са препустима

5.3 Начини постављања терета на конзоле

У табели 14 су дати примери доброг и лошег остављања терета на конзоле.

Табела 14 Начини постављања терета на конзоле

Добро постављен терет	Лоше постављен терет

6. Прорачун елемената конзолног регала

Потребно је извршити прорачун (проверу) стуба и конзоле према Еврокоду и ФЕМ пропису, ако конзолни регал носи 7 складишних јединица и где се једна јединица ослања на две конзоле. Складишну јединицу која се ослања на базе није потребно узети у обзир при прорачуну.

Димензије простора где је потребно поставити конзолни регал су:

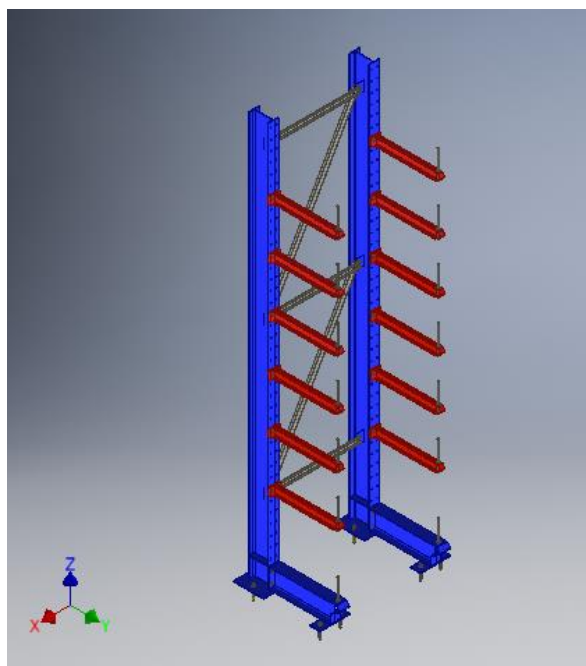
- Висина: $H_1=4,5$ m,
- Ширина: $L_1=2,5$ m.

Карактеристике складишне јединице су:

- Висина: $H_2=0,35$ m,
- Ширина: $b=0,6$ m
- Дужина: $L_2=2$ m,
- Маса: $m=1250$ kg.

На слици 20 је приказана претпостављена конфигурација конзолног регала где су:

- Висина стуба: $H=4$ m,
- Дужина конзоле: $l=0,6$ m,
- Корак конзоле: $h=0,5$ m,
- Растојање прве конзоле од пода: $h_1=0,9$ m,
- Осно растојање стубова: $L_3=1$ m.



Слика 20 Конфигурација регала

6.1 Материјал

Материјал стуба и конзоле је челик S235 са карактеристикама:

- дебљина $t \leq 40 \text{ mm}$,
- граница еластичности $f_y=235 \text{ МПа}$,
- модул еластичности $E=210000 \text{ МПа}$,
- Поасонов коефицијент $\nu = 0,3$.

6.2 Парцијални фактори сигурности

Парцијални фактор дејства је према [3] $\gamma_g=1,35$, а парцијални фактор својства је према [3] $\gamma_M=1,1$.

6.3 Класификација попречног пресека

6.3.1 Стуб

Одабрани профил стуба за претпостављену конфигурацију је стандардни профил IPE 200 чије су карактеристике:

Висина	200 mm
Ширина	100 mm
Висина ребра	159 mm
Дебљина ребра	5,6 mm
Дебљина ножице	8,5 mm
Површина попречног пресека	2850 mm ²
Пластични отпорни момент за у-у осу	220600 mm ³
Радијус инерције за у-у осу	82,6 mm
Пластични отпорни момент за z-z осу	44600 mm ³
Радијус инерције за z-z осу	22,4 mm

Како је стуб изложен савијању и притиску, тако је за испуњавање услова за прву класу попречног пресека потребно да је:

$$c / t_f \leq \frac{10 \cdot \varepsilon}{\alpha} \quad (6.1)$$

и

$$d / t_w \leq 72 \cdot \varepsilon \quad (6.2)$$

где су:

c – половина ширине ножице стуба; $c=50 \text{ mm}$,

t_f – дебљина ножице стуба;	$t_f=8,5 \text{ mm}$,
d – висина ребра стуба;	$d=159 \text{ mm}$,
t_w – дебљина ребра стуба;	$t_w=5,6 \text{ mm}$,
ε – карактеристика материјала;	$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1$,
α – коефицијент напона;	$\alpha=0,5$.

Узимајући у обзир све горе наведено, после провере следи:

$$c / t_f \leq \frac{10 \cdot \varepsilon}{\alpha} \Rightarrow 50 / 8,5 \leq \frac{10 \cdot 1}{0,5} \Rightarrow 5,882 \leq 20 \quad (6.3)$$

и

$$d / t_w \leq 72 \cdot \varepsilon \Rightarrow 159 / 5,6 \leq 72 \cdot 1 \Rightarrow 28,393 \leq 72 \quad (6.4)$$

Закључено је да је попречни пресек сврстан у прву класу.

6.3.2 Конзола

Одабрани профил конзоле за претпостављену конфигурацију је стандардни профил IPN 80 чије су карактеристике:

Висина	80 mm
Ширина	42 mm
Висина ребра	59 mm
Дебљина ребра	3,9 mm
Дебљина ножице	5,9 mm
Површина попречног пресека	758 mm ²
Пластични отпорни момент за у-у осу	22800 mm ³
Радијус инерције за у-у осу	32 mm
Пластични отпорни момент за z-z осу	5000 mm ³
Радијус инерције за z-z осу	9,1 mm

Како је конзола изложена чистом савијању, тако је за испуњавање услова за прву класу попречног пресека потребно да је:

$$c / t_f \leq 10 \cdot \varepsilon \quad (6.5)$$

и

$$d / t_w \leq 33 \cdot \varepsilon \quad (6.6)$$

где је:

$$\begin{aligned} c & - \text{половина ширине ножице конзоле;} & c &= 21 \text{ mm}, \\ t_f & - \text{дебљина ножице конзоле;} & t_f &= 5,9 \text{ mm}, \\ d & - \text{висина ребра конзоле;} & d &= 59 \text{ mm}, \\ t_w & - \text{дебљина ребра конзоле;} & t_w &= 3,9 \text{ mm}, \\ \varepsilon & - \text{карактеристика материјала;} & \varepsilon &= \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1. \end{aligned}$$

па је:

$$c / t_f \leq 10 \cdot \varepsilon \Rightarrow 21 / 5,9 \leq 10 \cdot 1 \Rightarrow 3,559 \leq 10 \quad (6.7)$$

и

$$d / t_w \leq 33 \cdot \varepsilon \Rightarrow 59 / 3,9 \leq 33 \cdot 1 \Rightarrow 15,128 \leq 33 \quad (6.8)$$

Закључено је да је попречни пресек сврстан у прву класу.

6.4 Провера конзоле

При прорачуну конзола, потребно је дефинисати број конзола на којима терет лежи и тежину терета поделити са тим бројем како би се видело колико оптерећење носи свака конзола. Пошто је задатком већ дефинисано да терет лежи на две конзоле, оптерећење по конзоли се може израчунати на следећи начин:

$$F_q = m \cdot \frac{g}{2} = 1250 \cdot \frac{9,81}{2} = 6131 \text{ N} \quad (6.9)$$

За даљи прорачун треба одредити сва оптерећења која делују на конзолу. Доминантни статички утицаји за прорачун конзола су углавном моменти савијања (M) и трансверзалне (смичуће) силе (V). Пошто у овом случају смичуће силе не постоје (односно узимају се у обзир само при прорачуну завртњева), конзолу треба проверити само на савијање. У овом погледу треба доказати да је у свим пресецима задовољен следећи услов:

$$M_{Sd} \leq M_{c,Rd} \quad (6.10)$$

Пошто су смичуће силе занемарљиве (у овом случају једнаке нули), а попречни пресек није ослабљен рупама за спојна средства, прорачунски момент отпорности попречног пресека прве класе којој припада конзола, може се одредити на следећи начин:

$$M_{c,Rd} = W_{pl} \cdot f_y / \gamma_M \quad (6.11)$$

За профил IPN 80, пластични отпорни момент има следећу вредност:

$$W_{pl} = 22800 \text{ mm}^3 \quad (6.12)$$

За материјал конзоле S235, напон на граници развлачења има вредност:

$$f_y = 235 \text{ N/mm}^2 \quad (6.13)$$

На основу једначине (6.11) следи да је:

$$M_{c,Rd} = 22800 \cdot 235 / 1,1 = 4870909,09 \text{ Nmm} \quad (6.14)$$

Веза између конзоле и стуба је остварена завртњевима и може се посматрати као крута, док се оптерећење конзоле може посматрати као континуално оптерећење, па се прорачунска вредност момента савијања у посматраном пресеку M_{sd} може израчунати на следећи начин:

$$M_{sd} = \frac{F_q \cdot l}{2} \cdot [1 - (z/l)]^2 \quad (6.15)$$

Пошто је максимални момент код конзоле, како је приказано на слици 11, у укљештењу, то значи да је $z = 0$, па се добија:

$$M_{sd} = \frac{F_q \cdot l}{2} \quad (6.16)$$

Ову вредност момента је потребно помножити одговарајућим коефицијентом сигурности за дејство:

$$M_{sd} = \frac{F_q \cdot l}{2} \cdot \gamma_G \quad (6.17)$$

Следи да је:

$$M_{sd} = \frac{6131 \cdot 0,6}{2} \cdot 1,35 = 2483,055 \text{ Nm} \quad (6.18)$$

Како је:

$$2483,055 \leq 4870,909 \quad (6.19)$$

Услов $M_{sd} \leq M_{c,Rd}$ је задовољен.

6.5 Провера стуба

Како је стуб оптерећен на комбиновано дејство притиска и савијања, потребно је извршити проверу посебно на дејства момента савијања као и нормалне силе.

- Дејство силе притиска

Карактеристична вредност оптерећења по конзоли је:

$$F = m \cdot \frac{g}{2} = 1250 \cdot \frac{9,81}{2} = 6131 \text{ N} \quad (6.20)$$

Прорачунска вредност оптерећења по конзоли је:

$$N = F \cdot \gamma_g = 6131 \cdot 1,35 = 8227 \text{ N} \quad (6.21)$$

Пошто је стуб вишеспратно оптерећен, дејство резултујуће аксијалне силе се рачуна као:

$$N_{S,Rd} = \sum_{i=1}^n N_i \cdot \alpha_i = \sum_{i=1}^n 8227 \cdot (0,05 + 0,1 + 0,15 + 0,25 + 0,45 + 0,73) = 14319 \text{ N} \quad (6.22)$$

- Дејство момента савијања

Резултујуће дејство момента савијања се рачуна као:

$$M_{S,Rd} = 6 \cdot N_{Sd} \cdot \frac{l}{2} = 6 \cdot 8227 \cdot \frac{0,6}{2} = 14899 \text{ Nm} \quad (6.23)$$

- Отпорност попречног пресека изложеног притиску

Задати профил припада првој класи попречног пресека, па се прорачун врши према том услову.

Редукована вредност отпорности попречног пресека изложеног притиску је:

$$N_{c,Rd} = A \cdot \frac{f_y}{\gamma_M} = 2850 \cdot \frac{235}{1,1} = 608864 \text{ N} \quad (6.24)$$

Редукована вредност отпорности попречног пресека изложеног извијању је:

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot \beta_A \cdot A \cdot \frac{f_y}{\gamma_M} = 0,06 \cdot 1 \cdot 2850 \cdot \frac{235}{1,1} = 36532 \text{ N} \quad (6.25)$$

Редукциони коефицијент се рачуна као:

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{8,45 + \sqrt{8,45^2 - 3,83^2}} = 0,06 \quad (6.26)$$

Коефицијент у функцији од криве извијања се рачуна као:

$$\phi = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right] = 0,5 \cdot \left[1 + 0,34 \cdot (3,83 - 0,2) + 3,83^2 \right] = 8,45 \quad (6.27)$$

Бездимензиона виткост се рачуна као:

$$\bar{\lambda} = \left(\frac{\lambda}{\lambda_1} \right) \cdot \sqrt{\beta_A} = \left(\frac{357}{93,9} \right) \cdot \sqrt{1} = 3,83 \quad (6.28)$$

Виткост за релевантни вид извијања се рачуна као:

$$\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{E / f_y} = 93,9 \cdot \varepsilon = 93,9 \cdot 1 = 93,9 \quad (6.29)$$

Релативна виткост се рачуна као:

$$\lambda = l_i / i = 8000 / 22,4 = 357 \quad (6.30)$$

Редукована висина стуба се рачуна као:

$$l_i = \beta \cdot L = 2 \cdot 4 = 8 \text{ m} \quad (6.31)$$

- Отпорност попречног пресека изложеног савијању

$$M_{c,Rd} = W_{pl} \cdot \frac{f_y}{\gamma_M} = 220600 \cdot \frac{235}{1,1} = 47128 \text{ Nm} \quad (6.32)$$

- Интеракција аксијалне силе и момента савијања

Редукована моментна отпорност попречног пресека који повезује дејства момента савијања и аксијалне силе се рачуна као:

$$M_{N,y,Rd} = 1,11 \cdot M_{pl,y,Rd} \cdot (1 - n) = 1,11 \cdot 47128 \cdot (1 - 0,02) = 51266 \text{ Nm} \quad (6.33)$$

где је n однос дејства аксијалне силе и пластичне отпорности профила стуба и рачуна се:

$$n = \frac{N_{Sd}}{N_{pl,Rd}} = \frac{14319}{608864} = 0,02 \quad (6.34)$$

- Провера стуба на резултујуће дејство:

Услов дејства резултујуће аксијалне силе и отпорности попречног пресека на притисак:

$$N_{Sd} \leq N_{c,Rd} \quad (6.35)$$

На основу једначине (6.35) следи:

$$14319 \leq 608864 \quad (6.36)$$

Услов дејства резултујуће аксијалне силе и отпорности попречног пресека на извијање:

$$N_{Sd} \leq N_{b,Rd} \quad (6.37)$$

На основу једначине (6.37) следи:

$$14319 \leq 36532 \quad (6.38)$$

Услов резултујућег дејства момента савијања и моментне отпорности се рачуна на основу:

$$M_{Sd} \leq M_{c,Rd} \quad (6.39)$$

На основу једначине (6.39) следи:

$$14899 \leq 47128 \quad (6.40)$$

Услов резултујућег дејства момента савијања и редуковане моментне отпорности за везу момента савијања и аксијалне силе се рачуна на основу:

$$M_{Sd} \leq M_{N,y,Rd} \quad (6.41)$$

Из једначине (6.41) следи:

$$14899 \leq 51266 \quad (6.42)$$

Услов за комбиновано дејство аксијалне силе и момента савијања за бочно непридржане стубове се рачуна као:

$$\frac{N_{Sd}}{\chi_z \cdot A \cdot f_y / \gamma_{M1}} + \frac{k_{LT} \cdot M_{y,Sd}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_y / \gamma_{M1}} \leq 1 \quad (6.43)$$

На основу једначине (6.43) следи:

$$\frac{14319}{0,06 \cdot 2850 \cdot 235 / 1,1} + \frac{0,85 \cdot 14899000}{0,6 \cdot 220600 \cdot 235 / 1,1} = 0,84 \leq 1 \quad (6.44)$$

Коефицијент k_{LT} из табеле 5 се рачуна као:

$$k_{LT} = 1 - \frac{\mu_{LT} \cdot N_{Sd}}{\chi_z \cdot A \cdot f_y} \leq 1 \quad (6.45)$$

На основу једначине (6.45) следи:

$$k_{LT} = 1 - \frac{0,42 \cdot 14319}{0,06 \cdot 2850 \cdot 235} = 0,85 \leq 1 \quad (6.46)$$

Коефицијент μ_{LT} из табеле 5 се рачуна као:

$$\mu_{LT} = 0,15 \cdot \bar{\lambda}_z \cdot \beta_{M,LT} - 0,15 \leq 9 \quad (6.47)$$

Па је на основу једначине (6.47):

$$\mu_{LT} = 0,15 \cdot 3,83 \cdot 1 - 0,15 = 0,42 \leq 9 \quad (6.48)$$

Редукциони коефицијент се рачуна као:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} = \frac{1}{1,15 + \sqrt{1,15^2 - 1,03^2}} = 0,6 \quad (6.49)$$

Где је ϕ_{LT} коефицијент у функцији од криве извијања и рачуна се као:

$$\phi_{LT} = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] = 0,5 \cdot \left[1 + 0,21 \cdot (1,03 - 0,2) + 1,03^2 \right] = 1,15 \quad (6.50)$$

Бездимензиона виткост се рачуна као:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \left(\frac{\lambda_{LT}}{\lambda_1} \right) \cdot \sqrt{\beta_A} = \left(\frac{96,85}{93,9} \right) \cdot \sqrt{1} = 1,03 \quad (6.51)$$

Виткост за релевантни вид извијања се рачуна као:

$$\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{E / f_y} = 93,9 \cdot \varepsilon = 93,9 \cdot 1 = 93,9 \quad (6.52)$$

Релативна виткост се рачуна као:

$$\lambda = l_i / i = 8000 / 82,6 = 96,85 \quad (6.53)$$

Пошто сви услови задовољавају критеријуме, може се закључити да претпостављена конфигурација конзолног регала испуњава захтеве пројектног задатка.

7. Развој методологије за аутоматски прорачун и генерисање модела конзолног регала

С циљем да се олакша и убрза поступак налажења оптималног техничког решења конзолног регала, развијена је методологија која то омогућава. Методологија се односи на аутоматски прорачун елемената конзолног регала уз помоћ софтверског пакета *Microsoft Office Excel* [9] и на основу тог прорачуна формирање 3Д модела као и документације уз помоћ софтверског пакета *Autodesk Inventor* [10].

На слици 21 може се видети упитник пројектног задатка за уношење жељених параметара конзолног регала у софтверу *Microsoft Office Excel*.

Слика 21 Пројектни задатак

Кориснику је омогућено да бира и уноси:

1. **Тип конзолног регала**
У питању је избор између једностраног и двостраног регала.
2. **Висину стуба**
Овде корисник уноси жељену висину стуба конзолног регала.
3. **Број стубова**
Број стубова се односи на један блок конзолног регала.
4. **Осно растојање**
У зависности од материјала који се складишти, корисник бира осно растојање између стубова.
5. **Дужину базе**
Дужина базе је у већини случајева као и дужина конзоле, међутим овим је омогућено да корисник сам одређује дужину базе.
6. **Дужину конзоле**
У зависности од габарита терета, корисник бира дужину конзоле.

7. Начин постављања конзола

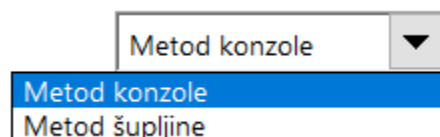
Постоје два начина постављања конзола на стуб што је приказано на слици 22. Први метод јесте метод конзоле, где корисник бира број једнако распоређених конзола по стубу. Други метод јесте метод чисте шупљине на основу којег корисник бира чисту шупљину између конзола. У оквиру ове методе могуће је задати три различите или исте димензије шупљина. Чиста шупљина *P1* са слике 21 односи се на растојање између базе и прве конзоле, шупљина *P2* се односи на чисто растојање између прве и друге конзоле, док се шупљина *P3* односи на растојање између друге и треће као и између свих осталих конзола после треће.

8. Оптерећење

Корисник овом опцијом уноси масу терета који је распоређен на један ниво конзола.

9. Број блокова и растојање блокова

Број блокова се односи на број истоветних блокова, док се растојање односи на основно растојање између последњег стуба првог блока и првог стуба наредног блока.



Слика 22 Избор метода постављања конзола на стуб

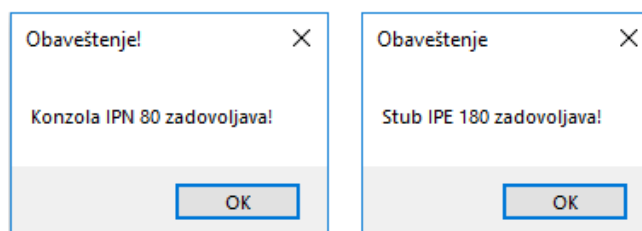
После унетих параметара, потребно је извршити прорачун конзолног регала. То се постиже притиском на дугме „**Proračun**“, са слике 21. Притиском на ово дугме, у позадини се покреће математички модел формиран у окружењу *Visual Basic for Application (VBA)*, који врши прорачун елемената конзолног регала на основу Еврокодова и ФЕМ прописа.

Стандардни профили чије су карактеристике имплементиране у прорачун стуба су IPE 180 – IPE 400.

Стандардни профили конзоле, чије су карактеристике имплементиране у прорачун су IPN 80 – IPN 160.

Стандардни елементи завртањске везе који су имплементирани у прорачун су M12 и M14, класе чврстоће 8.8 и 10.9.

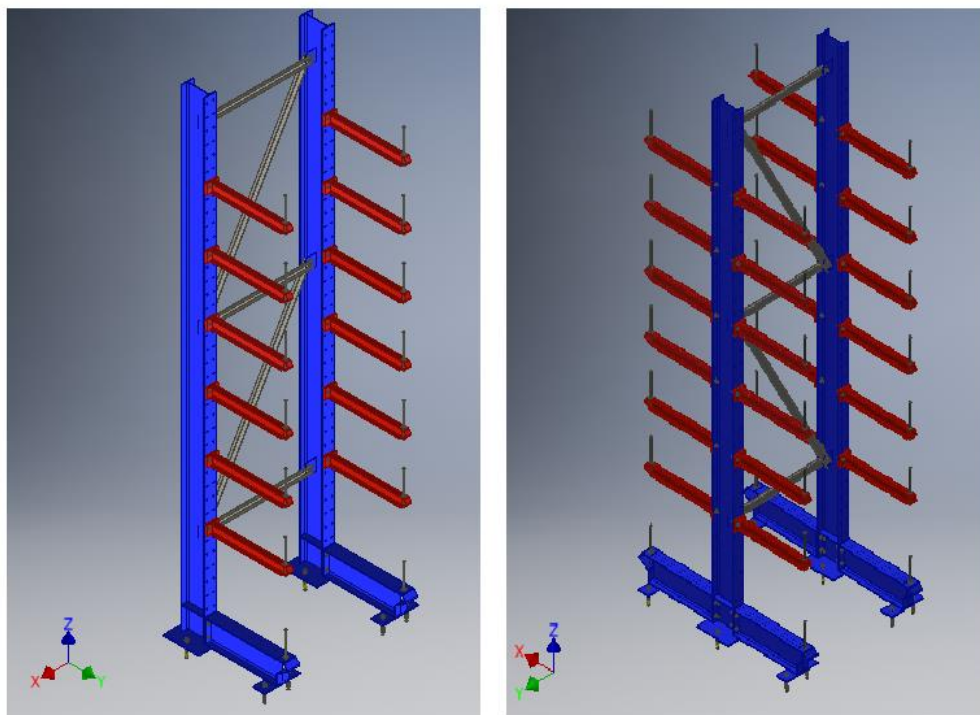
После извршеног прорачуна на екрану се појављују прозори за дијалог са обавештењем који профил конзоле и стуба задовољава прорачун, као што је приказано сликом 23.



Слика 23 Профили конзоле и стуба који задовољавају прорачун

На слици 21 се може уочити дугме „**3D Model**“ које кориснику омогућава креирање 3Д модела на основу прорачунатих елемената. Модел се формира на основу параметара који

повезују софтвере *Microsoft Office Excel* и *Autodesk Inventor*. На слици 24 су приказани једностранни и двострани конзолни регал са конфигурацијом са слике 21.



Слика 24 Приказ једностраног и двостраног конзолног регала

Као што је већ напоменуто, у склопу ове методологије кориснику је омогућено да на основу формираног 3Д модела креира техничку документацију притиском на дугме „**Dokumentacija**“, са слике 21, која се односи на технички цртеж који је дат у прилогу А.

У табели 15 приказане су аутоматски израчунате вредности површина конзолног регала које је потребно заштитити од корозије и спољних утицаја.

Табелом 16 приказана је спецификација елемената и материјала са вредностима које се генеришу аутоматски.

Табела 15 Површина за заштиту конзолног регала

POVRŠINA ZA ZAŠTITU							
Pozicija	Tip	Dimenzija (mm)	Jedinična površina (m ²)	Komada za jednostrani	Komada za dvostrani	Jednostrani (m ²)	Dvostrani (m ²)
Stub sa stopom	IPE200	4000	3,5	2	2	7,00	7,00
Baza sa stopom i uvodnikom	IPE200	600	0,64	2	4	1,28	2,56
Konzola - Sklop	IPN80	600	0,23	12	24	2,76	5,52
Horizontala U-HOP	U	900	0,18	3	3	0,54	0,54
Dijagonala U-HOP	U	1774	0,34	2	2	0,68	0,68
Graničnik (cinkovanje)	/	280	0,03	14	28	0,42	0,84
Ukupno (m ²):						12,26	16,30

Табела 16 Спецификација елемената и материјала

MASA/KOLIČINA									
Pozicija	Tip	Dimenzija (mm)	Jedinična zapremina (m ³ /kom)	Jedinična masa (kg/m)	Jedinična masa (kg/kom)	Komada za jednostrani	Komada za dvostrani	Ukupna masa jednostrani (kg)	Ukupna masa dvostrani (kg)
Stub	IPE200	4000	/	22,4	89,6	2	2	179,20	179,20
Ukrucenje stuba	/	9	0,00007	/	0,5495	4	4	2,20	2,20
Baza	IPE200	600	/	22,4	13,44	2	4	26,88	53,76
Uvodnik baze	/	200	0,0002	/	1,57	2	4	3,14	6,28
Konzola	IPN80	600	/	5,9	3,54	12	24	42,48	84,96
Uvodnik konzole	/	80	0,00002	/	0,157	12	24	1,88	3,77
Čeona ploča	/	80x100x20	0,00016	/	1,256	12	24	15,07	30,14
Prednja ploča baze	/	300x100x10	0,0003	/	2,355	2	4	4,71	9,42
Ploča stuba	/	300x300x10	0,0009	/	7,065	2	2	14,13	14,13
Ploča za vezu baze i stuba	/	9	0,00007	/	0,5495	4	8	2,20	4,40
Ploča ukrućenja	/	100x97x5	0,0000485	/	0,380725	6	6	2,28	2,28
Horizontalno ukrućenje	U	900	0,0002538	/	1,99233	3	3	5,98	5,98
Dijagonalno ukrućenje	U	1774	0,000500294	/	3,92731181	2	2	7,85	7,85
Graničnik	/	280	0,00003836	/	0,301126	14	28	4,22	8,43
Zavrtanj za ukrućenja	M12	30	/	/	0,052	6	6	0,31	0,31
Zavrtanj za konzole i baze	M12	50	/	/	0,079	32	64	2,53	5,06
Podloška za ukrućenja	M12	12	/	/	0,006	6	6	0,04	0,04
Podloška za konzole baze	M12	12	/	/	0,006	32	64	0,19	0,38
Elastična podloška ukrućenja	M12	12	/	/	0,006	6	6	0,04	0,04
Elastična podloška konzole i baze	M12	12	/	/	0,006	32	64	0,19	0,38
Navrtka ukrućenja	M12	12	/	/	0,026	6	6	0,16	0,16
Navrtka konzole i baze	M12	12	/	/	0,026	32	64	0,83	1,66
Podloška graničnika	M20	20	/	/	0,016	14	28	0,22	0,45
Anker	M16	16	/	/	0,295	8	12	2,36	3,54
								Ukupno (kg) bez zavrtanjske robe:	312,22
								Ukupno (kg):	412,80
									424,82

8. Напонско деформациона анализа конзолног регала

У овом поглављу је извршена напонско деформациона анализа конзолног регала применом методе коначних елемената.

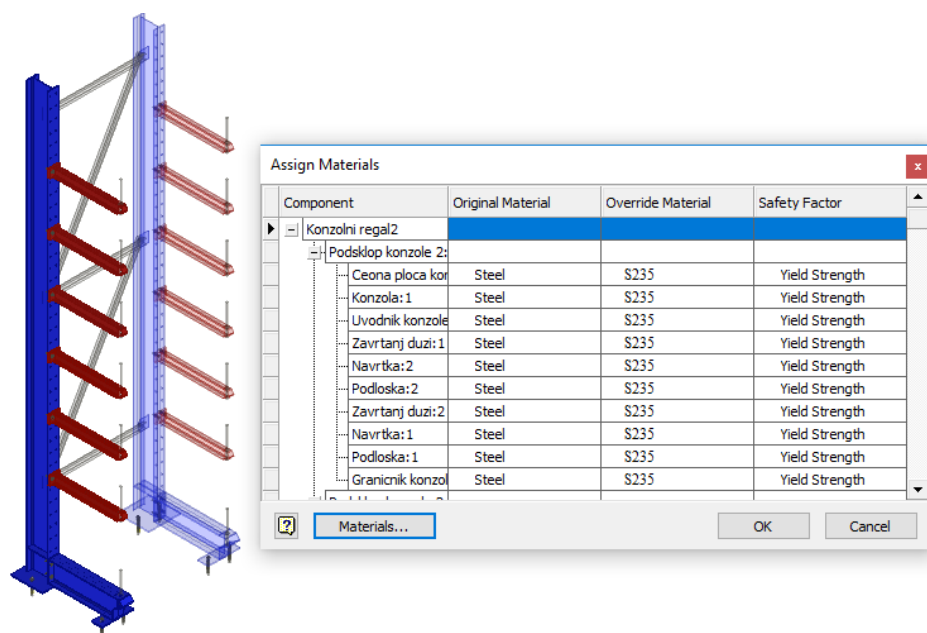
Наредни поступак у развоју производа је тестирање његове функционалности, издржљивости, трајности. То би у класичном, експерименталном прилазу захтевало много времена и средстава за прављење и испитивање прототипова.

Напонска анализа се врши директно на моделу направљеном у *Autodesk Inventor*-у. Команде у модулу *Stress Analysis* омогућавају задавање оптерећења и ограничења на склопу.

Да би се извршила анализа напонско – деформационог стања одређеног елемента, неопходно је дефинисати:

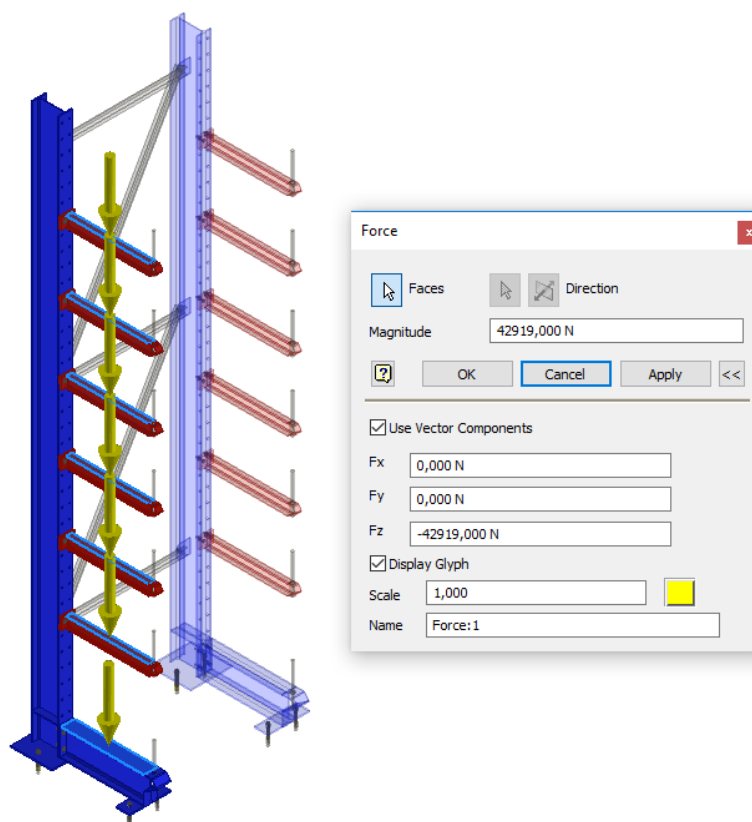
- Материјал,
- Оптерећења,
- Граничне услове,
- Услове контакта (ако постоје),
- Параметре мреже коначних елемената.

На слици 25 приказано је задавање материјала елементима конзолног регала. Материјал који се користи је конструкциони челик S235.



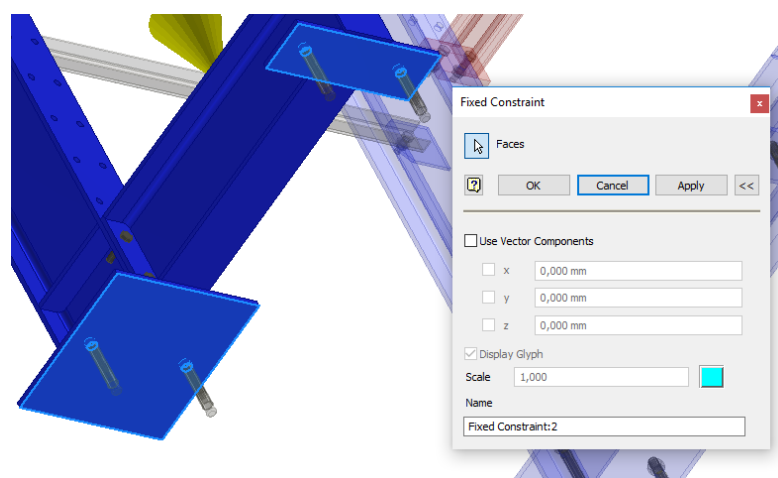
Слика 25 Задавање материјала

На слици 26 приказано је задавање дејстава на конзолни регал. Задата је сила од $F=6131,25$ N по конзоли (бази) и прорачун је извршен на једном стубу.



Слика 26 Задавање дејстава на конзолни регал

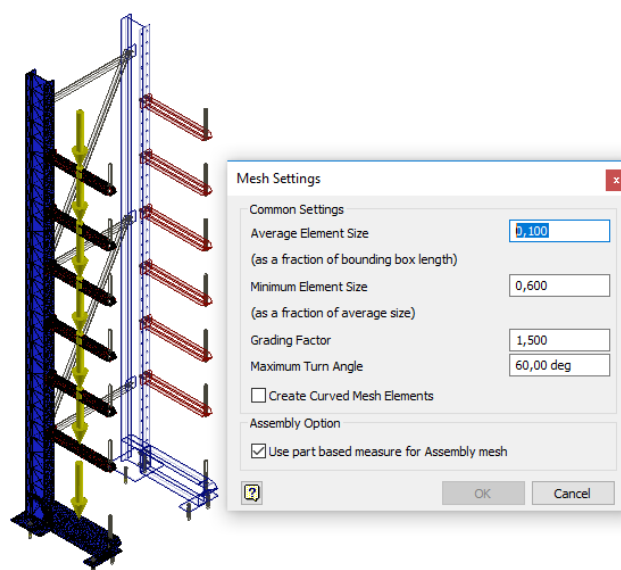
Задавање граничних услова извршено је фиксирањем доње површине плоча стуба и базе као и отвора за анкер завртњеве, што је приказано на слици 27.



Слика 27 Задавање граничних услова

Задавање контаката између елемената извршено је аутоматски у софтверу.

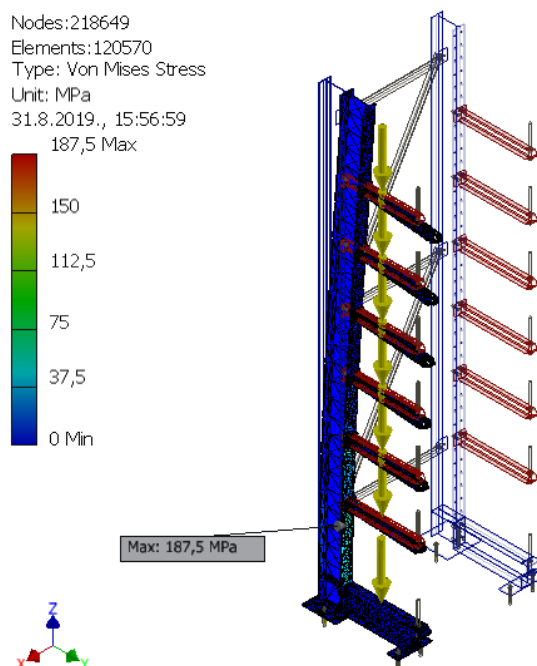
На слици 28 приказана је мрежа коначних елемената са њиховим карактеристикама. Мрежа је формирана од 218649 чворова и 120570 аутоматски формираних 3D коначних елемената.



Слика 28 Мрежа коначних елемената

После дефинисања свих потребних параметара за напонско деформациону анализу, може се извршити прорачун.

На слици 29 приказано је напонско стање. У питању су напони по *Von Mises*-овом критеријуму, који представља резултујуће напоне који се јављају у оптерећеном елементу.

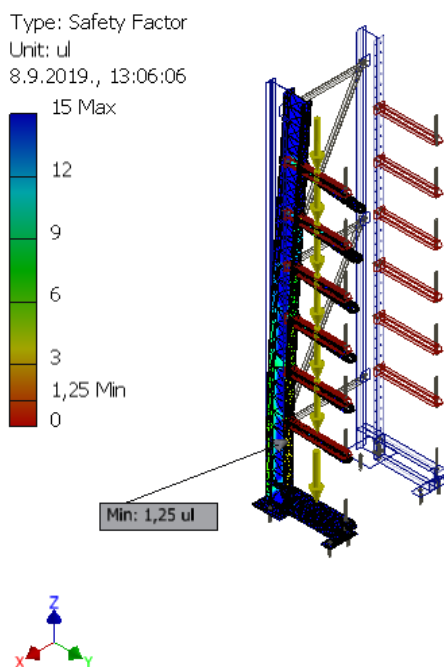


Слика 29 *Von Mises*-ови напони

Са слике 29 се може уочити да се максимални напон јавља при дну стуба, прецизније испод прве конзоле. Његова вредност износи $\sigma = 187,5 \text{ MPa}$.

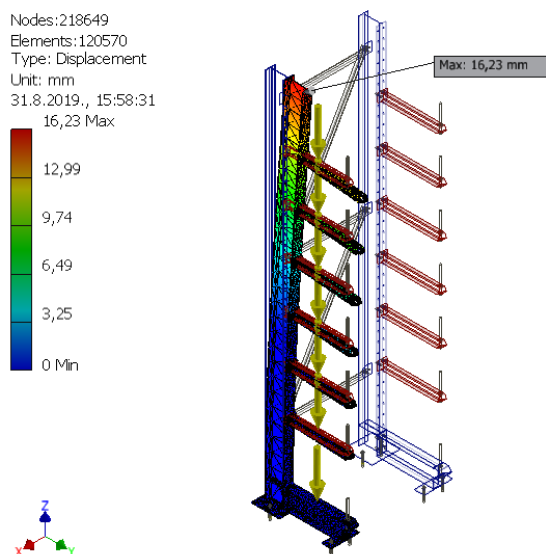
Одмах по одређивању напона може се одредити и степен сигурности као однос напона на граници течења и максималног напона, што је приказано на слици 30.

Минимална вредност степена сигурности износи $S = 1,25 \geq 1$.



Слика 30 Степен сигурности

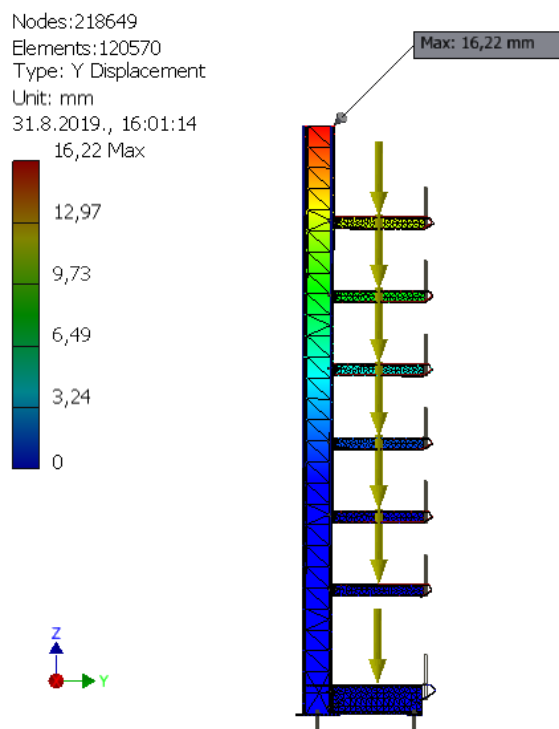
Укупна максимална померања износе $\delta = 16,23 \text{ mm}$ што је приказано на слици 31.



Слика 31 Укупна померања

Може се уочити да је максимално померање израчунато на врху стуба конзолног регала, што је и очекивано.

На слици 32 приказано је максимално померање у правцу осе у-у и износи $\delta_1 = 16,22 \text{ mm}$.



Слика 32 Максимално померање у правцу у-у осе

Према граничним стањима носивости максимално дозвољено померање стуба се рачуна као [1]:

$$\delta_d = \frac{H}{100 + \frac{H^2}{2000000}} = \frac{4000}{100 + \frac{4000^2}{2000000}} = 37,04 \text{ mm}$$

Закључује се да су померања у дозвољеним границама.

9. Закључак

Складишни системи имају кључну улогу у испуњавању савремених производних и дистрибутивних потреба наметнутих конкуретним тржиштем. При избору складишне опреме, тј. типа складишног регала, пројектант се суочава са широким спектром могућности.

С циљем да се олакша и унифицира поступак пројектовања конструкције, развијени су Еврокодови. Стандардима Еврокодова, одређена су општа правила за прорачун конструкција, за свакодневну употребу у прорачуну конструкција у целини и њених саставних производа, како традиционалне, тако и иновационе природе.

На основу Еврокодова и препорука стечених искуствено настао је FEM 10.2.09 пропис, као уско специјализовани документ који стоји на располагању пројектанту конзолних регала, с циљем да се олакша поступак прорачуна и конструисања.

После разматрања основних карактеристика и концепција конзолних регала, као и њихове функције, у оквиру овог рада је развијена методологија базирана на савременој рачунарској техници за поуздано аутоматско пројектовање и прорачун носећих елемената регалне конструкције. Овакав приступ складишној техници у погледу пројектовања неопходан је у циљу очувања квалитета, поузданости и конкуретности третираног производа.

На крају овог разматрања може се рећи да се коришћењем спреге CAD програмског пакета *Autodesk Inventor* и *Microsoft Excel* програма за табеларне прорачуне за израду 3Д модела конзолног регала, као и методе коначних елемената за прорачун елемената конструкције, долази до резултата који могу имати велику примену у свакодневној инжењерској пракси у области пројектовања и извођења конструкција конзолних регала.

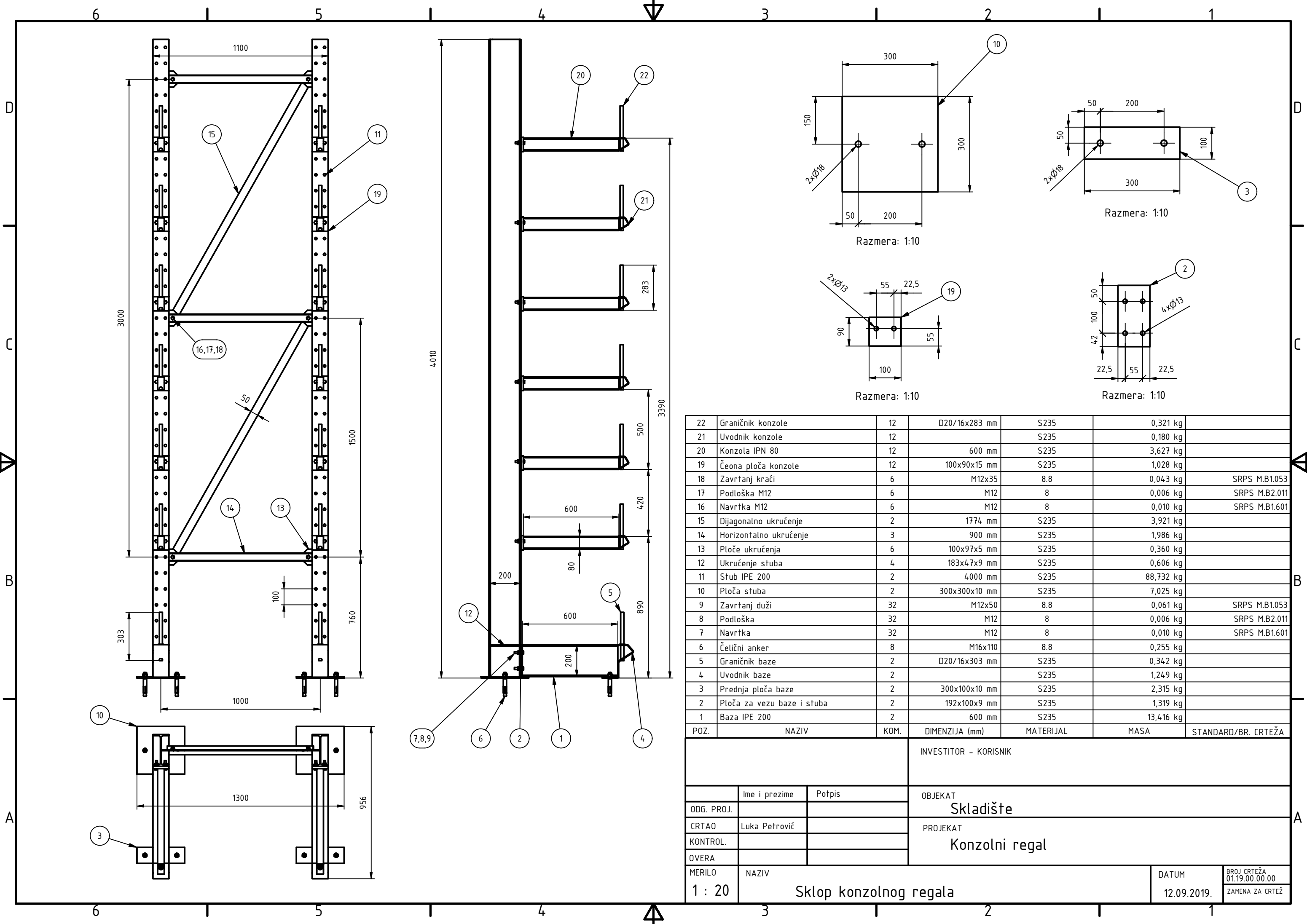
ПРИЛОГ А: Технички цртеж склопа конзолног регала

Табела А1 Пројектни задатак

1. Димензије простора	
Висина	4,5 m
Ширина	2,5 m
2. Карактеристике складишне јединице	
Дужина	2 m
Ширина	0,6 m
Висина	0,35 m
Маса	1250 kg
3. Димензије елемената	
Стуб	4 m
База	0,6 m
Конзола	0,6 m
Осно растојање стубова	1 m
4. Број елемената	
Стуб	2
База	2
Конзола	12
5. Оптерећење	
По нивоу	1250 kg
По стубу	3750 kg
По конзоли	625 kg

Табела А2 Графичка документација

Редни број	Назив цртежа	Име фајла	Број цртежа
1.	Sklop konzolnog regala	Konzolni regal.pdf	01.19.00.00.00



22	Graničnik konzole	12	D20/16x283 mm	S235	0,321 kg	
21	Uvodnik konzole	12		S235	0,180 kg	
20	Konzola IPN 80	12	600 mm	S235	3,627 kg	
19	Čeona ploča konzole	12	100x90x15 mm	S235	1,028 kg	
18	Zavrtnanj kraći	6	M12x35	8.8	0,043 kg	SRPS M.B1.053
17	Podloška M12	6	M12	8	0,006 kg	SRPS M.B2.011
16	Navrtka M12	6	M12	8	0,010 kg	SRPS M.B1.601
15	Dijagonalno ukrućenje	2	1774 mm	S235	3,921 kg	
14	Horizontalno ukrućenje	3	900 mm	S235	1,986 kg	
13	Ploče ukrućenja	6	100x97x5 mm	S235	0,360 kg	
12	Ukrućenje stuba	4	183x47x9 mm	S235	0,606 kg	
11	Stub IPE 200	2	4000 mm	S235	88,732 kg	
10	Ploča stuba	2	300x300x10 mm	S235	7,025 kg	
9	Zavrtnanj duži	32	M12x50	8.8	0,061 kg	SRPS M.B1.053
8	Podloška	32	M12	8	0,006 kg	SRPS M.B2.011
7	Navrtka	32	M12	8	0,010 kg	SRPS M.B1.601
6	Čelični anker	8	M16x110	8.8	0,255 kg	
5	Graničnik baze	2	D20/16x303 mm	S235	0,342 kg	
4	Uvodnik baze	2		S235	1,249 kg	
3	Prednja ploča baze	2	300x100x10 mm	S235	2,315 kg	
2	Ploča za vezu baze i stuba	2	192x100x9 mm	S235	1,319 kg	
1	Baza IPE 200	2	600 mm	S235	13,416 kg	
POZ.	NAZIV	KOM.	DIMENZIJA (mm)	MATERIJAL	MASA	STANDARD/BR. CRTEŽA

			INVESTITOR - KORISNIK		
			OBJEKT		
ODG. PROJ.			Skladište		
CRTAO			PROJEKT		
KONTROL.			Konzolni regal		
OVERA					
MERILO					
1 : 20			Sklop konzolnog regala		
			DATUM		
			12.09.2019.		
			BROJ CRTEŽA		
			01.19.00.00.00		
			ZAMENA ZA CRTEŽ		

Литература

- [1] FEM 10.2.09: *Racking and shelving product group, The Design Of Cantillever Racking*, Section X of the Federation Europeenne de la Manutention, June, 2015.
- [2] Д. Буђевац, З. Марковић, Д. Богавац, Д. Тошић, *Металне констрикције – основе прорачуна и конструисања*, Грађевински факултет Универзитета у Београду, Београд, 1997.
- [3] ЕВРОКОД 3: *ПРОРАЧУН ЧЕЛИЧНИХ КОНСТРУКЦИЈА*, ДЕО 1-1: *Општа правила и правила за прорачун зграда*, ДЕО 1-3: *Општа правила, Додатна правила за хладно обликоване танкозидне елементе и лимове*, ДЕО 1-8: *Прорачун веза*
- [4] ЕВРОКОД 1: *ОСНОВЕ ПРОРАЧУНА И ДЕЈСТВА НА КОНСТРУКЦИЈЕ*, ДЕО 1: *Основе прорачуна*, ДЕО 2-1: *Запреминске тежине, сопствена тежина и корисно оптерећење*, ДЕО 2-2: *Дејства на конструкције изложене пожару*, ДЕО 2-3: *Оптерећења од снега*, ДЕО 2-4: *Дејства ветра*
- [5] Р. Вујанац, *Развој методологије за пројектовање и прорачун носећих елемената складишних система – магистарска теза*, Машински факултет Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац, 2007.
- [6] Б. Зарић, Д. Буђевац, Д. Стипанић, *Челичне конструкције у грађевинарству*, ИРО Грађевинска књига, Београд, 1995.
- [7] Данило Рашковић, *Таблице из Отпорности материјала*, Грађевинска књига, Београд 1987.
- [8] ЕВРОКОД 8 – *ПРОРАЧУН ЧЕЛИЧНИХ КОНСТРУКЦИЈА*, ДЕО: 1-8, *Прорачун веза*, Грађевински факултет у Београду, Београд, 2005.
- [9] Софтверски пакет Microsoft Office Excel 2016
- [10] Софтверски пакет Autodesk Inventor 2016