

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: 323/2017

Павле Д. Живковић

Примена савремених софтвера за аутоматски прорачун и генерисање модела конзолних регала

Мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Доцент др Родољуб Вујанац - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог мастер рада потребно је да се изврши прорачун, избор елеменат, генерисање модела и техничке документације конзолних регала. За пројектовање користити ексклузивне програме базиране на најсавременијим концептима моделирања (CAD технологија), а за прорачуне методу граничних стања и методу коначних елемената.

Препоручена литература:

- [2] FEM 10.2.09: *CODE OF PRACTICE - The Design Of Cantilever Racking*, European Racking Federation, June, 2015.
- [5] Д. Буђевац, З. Марковић, Д. Богавац, Д. Тошић, *Металне констрикције – основе прорачуна и конструисања*, Грађевински факултет Универзитета у Београду, Београд, 1997.
- [7] Еврокод 3 – *Прорачун челичних конструкција Део: 1-3*, Грађевински факултет у Београду, Београд, 2009.

Крагујевац, 2019.

Ментор:
Др Родољуб Вујанац, доцент

Садржај:

1. Увод	1
2. Конструкција конзолног регала	2
2.1 Стуб	2
2.2 База	3
2.3 Конзола	4
2.4 Укрућења	5
2.5 Елементи за везу	5
2.6 Димензионисање конзолног регала	6
2.7 Постављање терета на конзолне регале	6
3. Развој методологије за аутоматски прорачун конзолних регала	7
3.1 База података	7
3.2 Пројектни задатак	10
3.3 Прорачун елемената конзолног регала	16
3.3.1 Прорачун конзоле према Еврокоду 3	16
3.3.1.1 Код за прорачун конзоле у VBA	23
3.3.2 Прорачун стуба према Еврокоду 3	25
3.3.2.1 Прорачун отпорности попречних пресека на комбиновано дејство	29
3.3.2.2 Прорачун отпорности елемената на комбинована дејства	31
3.3.2.3 Код за прорачун стуба у VBA	34
3.3.3 Прорачун завртањске везе према Еврокоду 3	44
3.3.3.1 Аутоматизација прорачуна завртањске везе	46
3.3.4 Учитавање <i>кодова</i>	48
4. Поступак генерисања модела	49
5. Поступак генерисања документације	52
5. Провера конзолног регала методом коначних елемената	56
5.1 Дефинисање материјала модела	57
5.2 Дефинисање ограничења	58
5.3 Задавање оптерећења	58
5.4 Дефинисање контаката	59
5.5 Дефинисање мреже коначних елемената	59
5.6 Покретање анализе	60

5.7 Анализа резултата.....	60
6. Закључак.....	62
ПРИЛОГ А: ГЕНЕРИСАЊЕ ДОКУМЕНТАЦИЈЕ	63
Литература	64

Резиме

У овом раду детаљно је описана методологија која служи за аутоматски прорачун и генерисање модела и документације конзолних регала. Методологија подразумева параметарско повезивање софтвера за табеларне прорачуне *Microsoft Excel*, у оквиру кога је извршен прорачун, и *CAD* програмског пакета *Autodesk Inventor*, где се врши генерисање модела и документације. Објашњена је функција конзолних регала и дат је опис свих његових главних компонената. Приказан је поступак израде методологије, односно унос базе података и кодова за прорачун. Приказан је изглед упитника који корисник треба да попуни како би добио модел тражене конфигурације конзолног регала. Дато је упутство за његово попуњавање и коришћење. Описан је поступак повезивања излазних параметара програма са 3Д софтвером *Inventor*. Приказан је модел једне конфигурације конзолног регала, а затим и изглед документације и спецификација те конфигурације. Извршена је анализа истог регала методом коначних елемената и дат је приказ добијених резултата. Сам циљ креирања ове методологије био је оптимизација конструкције, одржање њене сигурности, као и могућност израде техничких решења за кориснике у што мањем временском року. Ово обезбеђује знатну уштеду материјала потребног за израду регала, али и време потребно за израду решења што је од пресудног значаја за успешно пословање.

Кључне речи: *конзола, регал, методологија, софтвер, метода коначних елемената*

Abstract

This paper describes the methodology for automatic calculation and generation of 3D model and technical documentation of the cantilever racks. The methodology involves parametric connection of software for tabular calculations, Microsoft Excel and the CAD software package Autodesk Inventor, for modeling and technical documentation. The function of the cantilever rack is explained and a description of all its main components is given. The method of making the methodology, i.e. entering the database and codes for the calculation is presented. The questionnaire that the user needs to fill in is shown in order to obtain the model of the required configuration of the cantilever rack. Instructions how to fill and use it are given. The procedure of connecting the output parameters with 3D software Inventor is described. The model of one configuration of the cantilever rack is shown, and then the layout of the rack and the specifications of the configuration are shown, as well. Analysis of the same rack was performed using the finite element method and the obtained results are discussed. The goal of this methodology was to optimize structure, keep its security as well as the possibility to make technical solutions for customers within the shortest time. This provides significant savings in the material required for making of racks, but also the time needed to make solutions, which is crucial for successful business operations.

Key words: *arm, rack, methodology, software, Finite element method*

1. Увод

Развојем индустрије и повећањем производних капацитета долази и до повећања количине материјала који се мора ускладиштити, због чега постоји све већа потреба за разним врстама складишних система. Често коришћени складишни системи су конзолни регали.

Конзолни регали представљају челичне конструкције које омогућавају брзо и једноставно складиштење и приступ роби, како у производним халама, радионицама, складиштима тако и на отвореном простору. Роба која се складишти на конзолним регалима најчешће је великих габарита, где су једна или две димензије знатно веће од осталих, као на пример лимови, шипкасти материјали, цеви или челични профили. Палетизована роба се ређе складишти у њих и за њу се најчешће примењују палетни регали. Опслуживање конзолних регала се углавном врши транспортно-манипулативним средствима, односно виљушкарима различитих носивости. Основни елементи једног конзолног регала су: стуб, база, конзола, хоризонтална и дијагонална укрућења и елементи за везу. Сваки произвођач развија свој тип конструкције регала. Према конфигурацији регал може бити једностран или двостран. Код једностраног, конзоле и база се налазе са једне стране стуба, док су код двостраног конзоле и база распоређени са обе стране стуба.

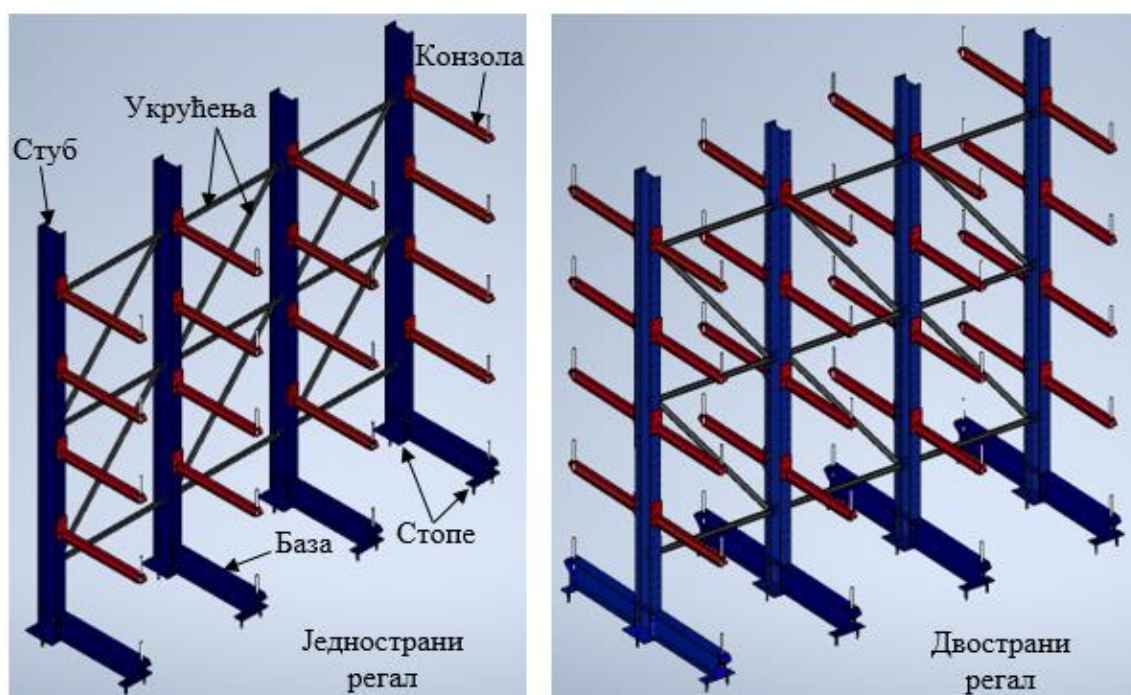
Конзолни регали су челичне конструкције па њихов прорачун треба да буде извршен према важећим стандардима и прописима. Најсавременији стандарди су Еврокодovi којима су одређена општа правила за прорачуне конструкција, а обухваћени су и неки специфични објекти. Због овога, при пројектовању конзолних регала, потребно је користити и прописе који се специјално на њих односе. Према томе, прорачун конзолних регала мора да буде извршен и према FEM пропису. Овај пропис одређује потребне принципе и захтеве који се примењују на све врсте конструкција конзолних регалних система, произведених од челичних елемената намењених за складиштење терета.

У циљу што ефикасније и брже израде техничких решења за кориснике, као и оптимизације конструкције конзолних регала, потребно је прорачун и избор елемената на неки начин аутоматизовати. Аутоматизација процеса прорачуна подразумева употребу савремених софтвера за прорачун, моделирање, израду документације и по могућству њихову спрегу. Коришћењем спреге програма за табеларне прорачуне и CAD програмског пакета развијена је методологија за аутоматско генерисање тродимензионалног модела конзолног регала и његове документације. Модел је одређен низом параметара који дефинишу димензије и поједине односе елемената регала. Применом методе коначних елемената врши се провера да ли напони и деформације изабране концепције регала задовољавају граничне вредности.

2. Конструкција конзолног регала

Конзолни регали представљају носеће конструкције које се производе од стандардних топловаљаних *I* профила или од хладно обликованих профила (ХОП). Према конфигурацији они могу бити једностранни или двострани, слика 1. Састоје се од неколико главних подсклопова, приказаних на слици 1:

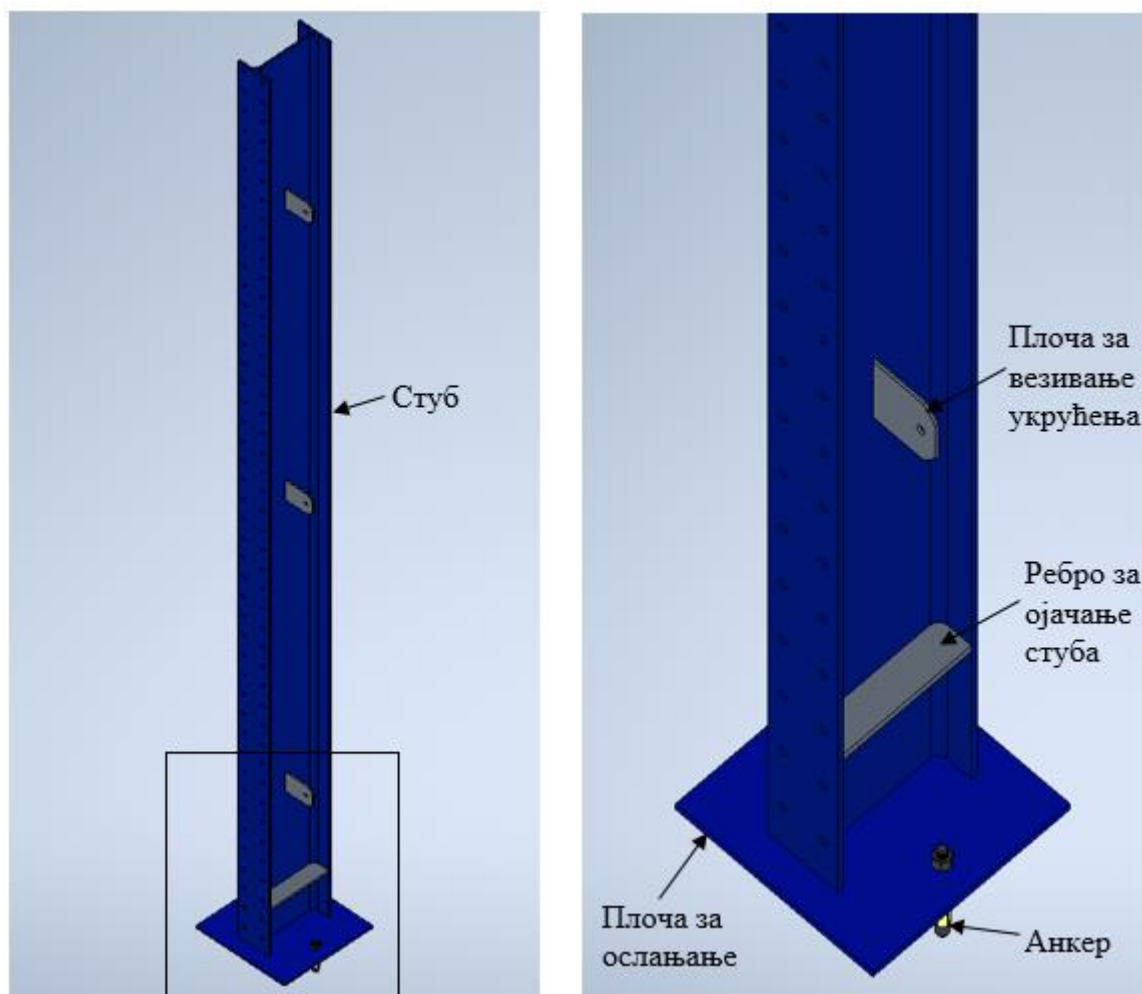
- Стуб;
- База;
- Конзола;
- Укрућења.



Слика 1 Главни подсклопови једностраног и двостраног регала

2.1 Стуб

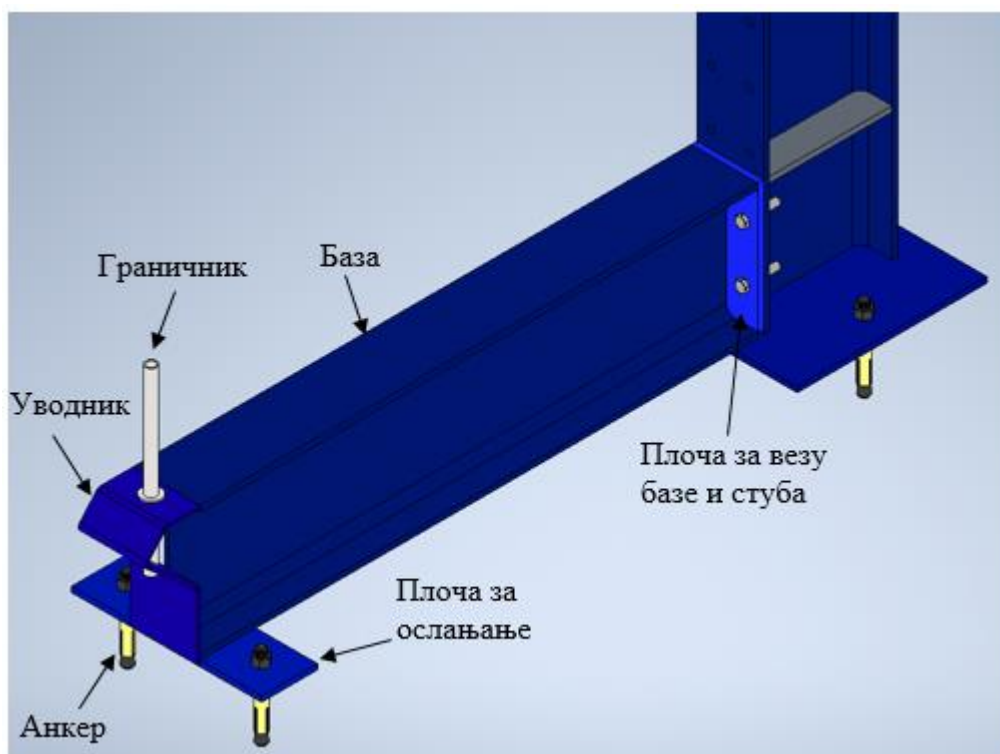
Стуб је најкритичнији елемент регала пошто носи целокупно оптерећење које се преноси са конзола. Оптерећен је истовремено на извијање и савијање, тако да се мора димензионисати на дејство аксијалне силе, момент савијања као и комбиновано дејство. Израђује се од топловаљаних *IPE* профила, при чему је могуће да се користе сви профили од *IPE* 180 до *IPE* 400. Најчешће се користе профили до *IPE* 300, док се јачи ређе користе, и то само у случајевима веома великих оптерећења и висина стубова (нпр. за оптерећења преко 10 t по стубу и висине преко 5 метара). За доњу страну стуба је најчешће заварена плоча за ослањање, односно стопа кроз коју се врши фиксирање стуба за подлогу. У доњем делу стуба, у висини горње ножице базе, са обе стране, често се постављају плочице тј. ребра, која служе за додатно ојачање стуба. Ради повезивања два суседна стуба хоризонталним и вертикалним укрућењима, на ребрима стубова се постављају плоче за везивање укрућења. Везивање се врши завртњевима. У циљу подешавања висине конзола у вертикалном правцу дуж стуба, врши се перфорација стуба на одређеном кораку. Подсклоп стуба је приказан на слици 2.



Слика 2 Подсклоп стуба

2.2 База

Поред своје основне функције обезбеђивања стабилности конструкције против превртања, база представља и први ниво регала на који се складишти роба. Као и стубови и базе се израђују од топловаљаних *IPE* профила. Димензије профила базе се најчешће усвајају на основу димензија профила стуба, односно за базу и стуб се увек користе исти профили. Дужина базе је у већини случајева једнака дужини конзола, али по захтеву корисника може бити и различита, најчешће дужа. На крају базе се налази уводник који олакшава постављање складишне јединице, тј. омогућава да складишна јединица „склизне“ на базу. Димензије уводника се усвајају на основу димензија базе. На сваком уводнику се налази отвор за постављање граничника који служи за адекватно складиштење материјала који су склони котрљању. За доњу површину базе је заварена плоча за ослањање, кроз коју се врши фиксирање за подлогу. За базу је заварена и плоча за везу са стубом, која је остварена завртњевима. Подсклоп базе је приказан на слици 3.

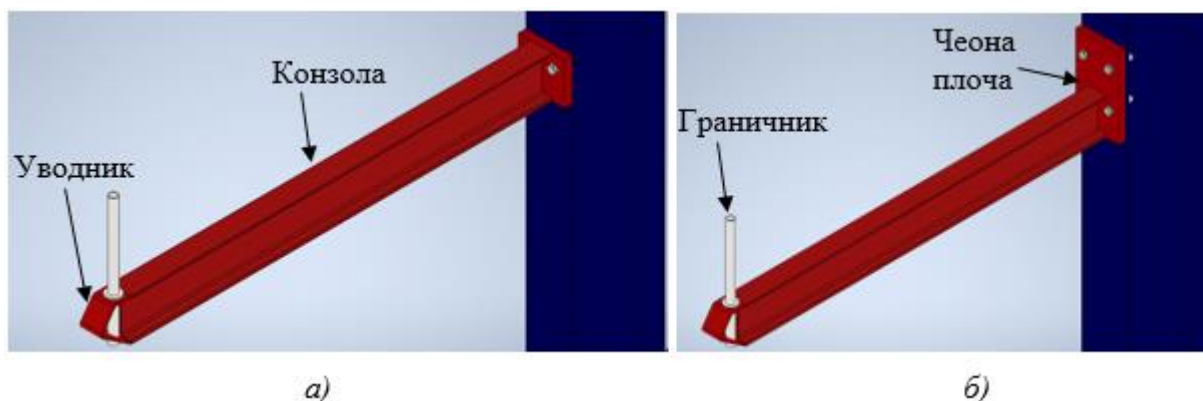


Слика 3 Подсклоп базе

2.3 Конзола

Конзоле представљају носеће елементе регала на које се складишти терет. Распоређене су вертикално дуж стуба и њихов број се одређује на основу захтева корисника, а према расположивом простору и габаритима терета. Оптерећене су само на савијање и то оптерећење је једнако тежини терета подељеним са бројем конзола по једном нивоу (нпр. ако је терет масе 2000 kg, а ниво се састоји од 4 конзоле, свака конзола ће носити оптерећење од 500 kg). Један ниво представљају оне конзоле које се налазе у хоризонталној равни, а број нивоа је одређен бројем конзола по стубу. Израђују се од топловаљаних *IPN* или *IPE* профила, а стандардне димензије профила које се користе су од *IPN* 80 до *IPN* 160 или од *IPE* 80 до *IPE* 160. Дужине конзола су најчешће типизирание па могу бити на пример: 400 mm, 600 mm, 800 mm, 1000 mm, 1250 mm, 1500 mm или 2000 mm. Дужина се бира у зависности од димензија терета, односно од његове ширине (нпр. ако је ширина терета 1100 mm, дужина конзоле мора бити једнака или већа од 1100 mm). Најчешће се усваја прва већа стандардна вредност. Међутим, често према специјалним захтевима, дужина конзоле не мора увек бити унифицирана. Са задње стране конзоле налази се заварена чеона плоча којом се остварује веза између конзоле и стуба. Према стандарду за везу конзоле и стуба, она може бити остварена преко чеоне плоче са 2 или 4 завртња, у зависности од оптерећења конзоле. Уколико се веза остварује са 2 завртња тада је висина плоче приближно једнака висини профила конзоле, а ако су у питању 4 завртња, тада је висина плоче већа од висине профила конзоле због размештаја завртњева. Према конструктивном извођењу, ширина плоче је увек једнака ширини ножице стуба, а дебљина плоче се усваја према стандарду [1]. На предњем крају

се, као и код базе, налази уводник за лакше одлагање терета, кроз који се поставља граничник. Подсклоп конзоле је приказан на слици 4.

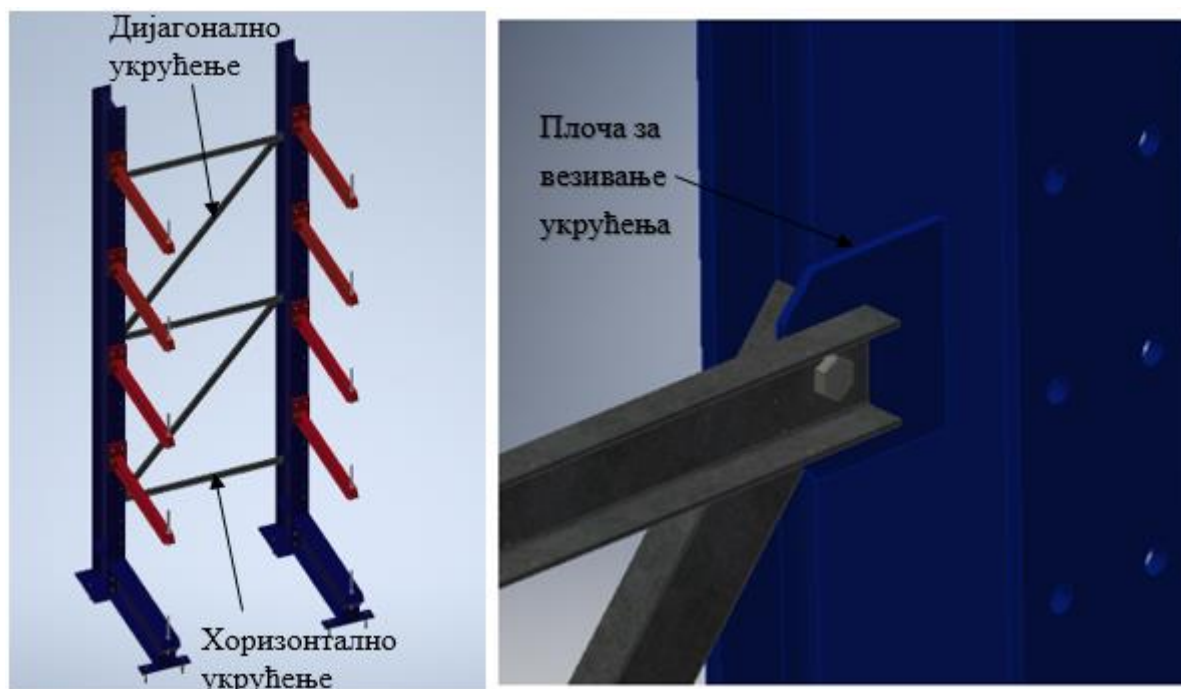


Слика 4 Подсклоп конзоле

а) веза остварена са два завртња; б) веза остварена са четири завртња

2.4 Укрућења

Укрућења имају улогу одржања стабилности регала у подужном правцу, односно спречавају појаву „њихања“ регала. Могу бити хоризонтална и дијагонална. За стубове се везују завртњевима преко плоча предвиђених за њихово везивање. У зависности од висине стуба можемо имати један или више редова укрућења. Димензије зависе од растојања између два стуба. Најчешће се израђују од ХОП профила. Приказ хоризонталних и дијагоналних укрућења је дат на слици 5.



Слика 5 Хоризонтално и дијагонално укрућење

2.5 Елементи за везу

Сви елементи конзолног регала су повезани завртњевима, али потребно је димензионисати само везу између конзоле и стуба пошто је она најкритичнија. Добијени

завртњеви се усвајају и за везу базе и стуба ради унификације. Класе чврстоће које се користе за завртњеви су 8.8 и 10.9, у зависности од потребне носивости.

2.6 Димензионисање конзолног регала

Конструкција конзолног регала је оптерећена на савијање, притисак и комбинацију ова два дејства. Приликом прорачуна, било да се ради о једностраном или двостраном регалу, димензионисање се врши као да је регал једностран. Овакав поступак се врши јер уколико су обе стране двостраног регала оптерећене, тада практично момент савијања стуба не постоји, што представља најповољнији случај у погледу савијања. Ако је само једна страна двостраног регала оптерећена, што је најнеповољнији случај у погледу савијања, тај регал се може сматрати једностраним. Што се тиче аксијалне силе, иако је двоструко већа код двостраног регала, она не утиче значајно на димензионисање, било да се ради о једностраном или двостраном регалу.

2.7 Постављање терета на конзолне регале

За опслуживање конзолних регала се користе најчешће чеони или бочни виљушкари, или специјални кранови са стубом и виљушком. Како би терет био осигуран од пада са конзоле потребно је испоштовати неке препоруке дате у табели 1 [2].

Табела 1 Правилно и неправилно постављање различитих врста терета [2]

Правилно $a \leq L/2$	Неправилно $a > L/2$
a - растојање од стуба до центра масе терета F - оптерећење L - дужина конзоле	

3. Развој методологије за аутоматски прорачун конзолних регала

Пошто не постоје комерцијални специјализовани софтвери за прорачун конзолних регала, поступак прорачуна се до сада углавном вршио аналитички. Оваква метода је давала приближно тачне резултате који су увек били на страни сигурности, тако да је регал у већини случајева био предимензионисан, што је поскупљивало саму конструкцију.

Како би се конструкција регала оптимизовала, али у исто време и одржала њена сигурност, циљ је да се развије методологија која ће аутоматски, на основу унетих жељених података, прорачунавати елементе регала. Након извршеног прорачуна, генерисаће се параметри који се односе на све димензије елемената регала и њихов распоред у конструкцији, на основу којих ће се формирати тродимензионални модел регала. Поред оптимизације конструкције, предност ове методологије је и веома брза израда идејних решења. Корисник у минималном временском року може да добије предлог изгледа конструкције за тражену концепцију регала.

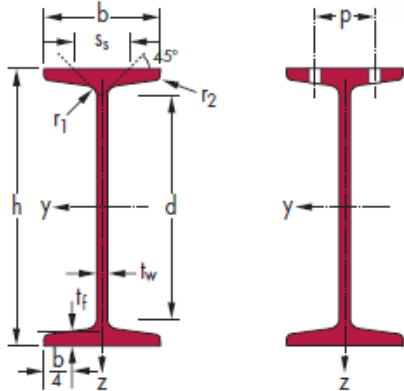
3.1 База података

Методологија која омогућава аутоматски прорачун конзолног регала развијена је коришћењем софтверског пакета *Microsoft Excel* [3] за табеларне прорачуне. Поред *Excel*-а коришћен је и програмски језик *Visual Basic for Application (VBA)*, кога подржавају све главне *Office*-ове апликације као што су: *Word*, *PowerPoint*, *OutLook*, *FrontPage*, *Access*, *Excel*.

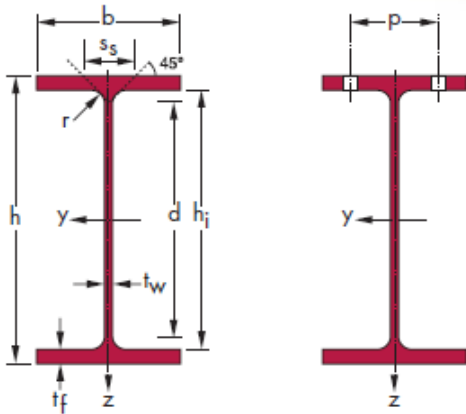
У *Excel*-у је формирана база података коју чине сви подаци потребни за прорачун, везани за *IPN* профиле, табела 2, *IPE* профиле, табеле 3 и 4, и завртњеве, табела 5. Потребни подаци за *IPN* и *IPE* профиле су димензије профила, као и њихове статичке карактеристике. Подаци потребни за завртњеве су пречници завртњева и отвора за завртњеве, као и површине пресека завртњева. Базу података чине сви завртњеви од М12 до М30.

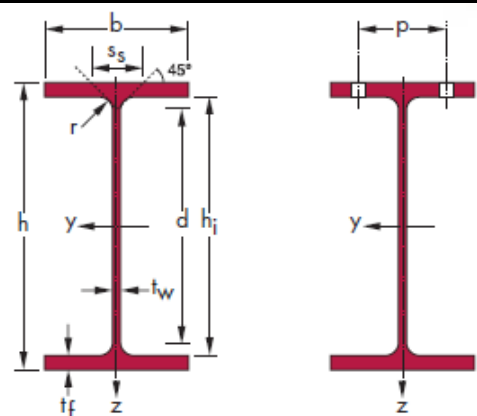
Табела 2 Подаци за *IPN* профиле (од *IPN* 80 до *IPN* 160) [4]

Величина	IPN 80	IPN 100	IPN 120	IPN 140	IPN 160
Висина h (mm)	80	100	120	140	160
Ширина b (mm)	42	50	58	66	74

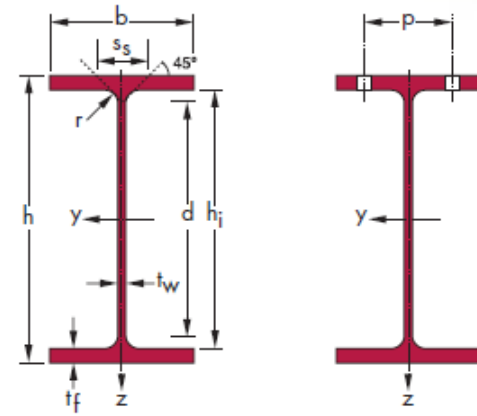
					
Величина	IPN 80	IPN 100	IPN 120	IPN 140	IPN 160
Дебљина ребра t_w (mm)	3,9	4,5	5,1	5,7	6,3
Дебљина ножице t_f (mm)	5,9	6,8	7,7	8,6	9,5
Полупречник ребра r_1 (mm)	3,9	4,5	5,1	5,7	6,3
Полупречник ножице r_2 (mm)	2,3	2,7	3,1	3,4	3,8
Површина попречног пресека A (mm ²)	758	1060	1420	1830	2208
Висина ребра без радијуса d (mm)	59	75,7	92,4	109,1	125,8
Момент инерције I_y (mm ⁴)	778000	1710000	3280000	5730000	9350000
Ел. отпорни момент $W_{el,y}$ (mm ³)	19500	34200	54700	81900	117000
Пл. отпорни момент $W_{pl,y}$ (mm ³)	22800	39800	63600	95400	136000
Радијус инерције i_y (mm)	32	40,1	48,1	56,1	64
Површина смицања A_{vz} (mm ²)	341	485	663	865	1083
Момент инерције I_z (mm ⁴)	62900	122000	215000	352000	547000
Ел. отпорни момент $W_{el,z}$ (mm ³)	3000	4880	7410	10700	14800
Пл. отпорни момент $W_{pl,z}$ (mm ³)	5000	8100	12400	17900	24900
Радијус инерције i_z (mm)	9,1	10,7	12,3	14	15,5

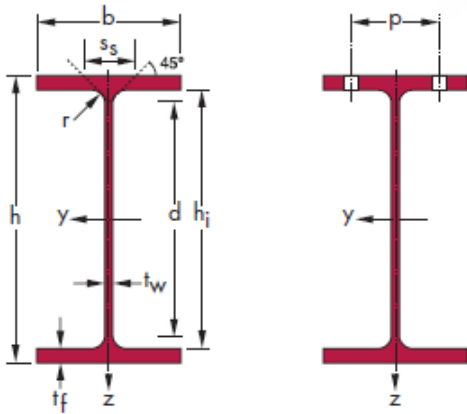
Табела 3 Подаци за IPE профиле (од IPE 180 до IPE 270) [4]

					
Величина	IPE 180	IPE 200	IPE 220	IPE 240	IPE 270
Висина h (mm)	180	200	220	240	270
Ширина b (mm)	91	100	110	120	135
Дебљина ребра t_w (mm)	5,3	5,6	5,9	6,2	6,6
Дебљина ножице t_f (mm)	8	8,5	9,2	9,8	10,2
Полупречник r (mm)	9	12	12	15	15

					
Величина	IPE 180	IPE 200	IPE 220	IPE 240	IPE 270
Површина попречног пресека A (mm ²)	2390	2850	3340	3910	4590
Висина ребра h_i (mm)	164	183	201,6	220,4	249,6
Висина ребра без радијуса d (mm)	146	159	177,6	190,4	219,6
Ø (mm)	10	10	12	12	16
Минимално растојање отвора (mm)	48	54	60	66	72
Максимално растојање отвора (mm)	48	58	62	68	72
Момент инерције I_y (mm ⁴)	13170000	19430000	27720000	38920000	57900000
Ел. отпорни момент $W_{el,y}$ (mm ³)	146300	194300	252000	324300	428900
Пл. отпорни момент $W_{pl,y}$ (mm ³)	166400	220600	285400	366600	484000
Радијус инерције i_y (mm)	74,2	82,6	91,1	99,7	112,3
Површина смицања A_{vz} (mm ²)	1125	1400	1588	1914	2214
Момент инерције I_z (mm ⁴)	1009000	1424000	2049000	2836000	4199000
Ел. отпорни момент $W_{el,z}$ (mm ³)	22160	28470	37250	47270	62200
Пл. отпорни момент $W_{pl,z}$ (mm ³)	34600	44610	58110	73920	96950
Радијус инерције i_z (mm)	20,5	22,4	24,8	26,9	30,2

Табела 4 Подаци за IPE профиле (од IPE 300 до IPE 400) [4]

				
Величина	IPE 300	IPE 330	IPE 360	IPE 400
Висина h (mm)	300	330	360	400
Ширина b (mm)	150	160	170	180
Дебљина ребра t_w (mm)	7,1	7,5	8	8,6
Дебљина ножице t_f (mm)	10,7	11,5	12,7	13,5

				
Величина	IPE 300	IPE 330	IPE 360	IPE 400
Полупречник r (mm)	15	18	18	21
Површина попречног пресека A (mm ²)	5380	6260	7270	8450
Висина ребра h_i (mm)	278,6	307	334,6	373
Висина ребра без радијуса d (mm)	248,6	271	298,6	331
Ø (mm)	16	16	22	22
Минимално растојање отвора (mm)	72	78	88	96
Максимално растојање отвора (mm)	86	96	88	98
Момент инерције I_y (mm ⁴)	83560000	117700000	162700000	231300000
Ел. отпорни момент $W_{el,y}$ (mm ³)	557100	713100	903600	1156000
Пл. отпорни момент $W_{pl,y}$ (mm ³)	628400	804300	1019000	1307000
Радијус инерције i_y (mm)	124,6	137,1	149,5	165,5
Површина смицања A_{vz} (mm ²)	2568	3081	3514	4269
Момент инерције I_z (mm ⁴)	6038000	7881000	10430000	13180000
Ел. отпорни момент $W_{el,z}$ (mm ³)	80500	98520	122800	146400
Пл. отпорни момент $W_{pl,z}$ (mm ³)	125200	153700	191100	229000
Радијус инерције i_z (mm)	33,5	35,5	37,9	39,5

Табела 5 Подаци за завртњеве [4]

Величина	M12	M14	M16	M18	M20	M22	M24	M27	M30
Пречник завртња d (mm)	12	14	16	18	20	22	24	27	30
Пречник отвора d_0 (mm)	13	15	18	20	22	24	26	30	33
Површина п. п. A (mm ²)	113,1	153,9	201,1	254,3	314,2	380,1	452,4	572,6	706,9
Површина п. п. A_s (mm ²)	84,3	115	157	193	245	303	353	459	561

3.2 Пројектни задатак

Пројектни задатак је формиран у виду упитника, који се попуњава према захтеву корисника, слика 6. У овом случају упитник представља улаз, док добијени параметри за генерисање модела регала представљају излаз, добијен након прорачуна свих елемената. У упитнику, корисник уноси почетне параметре који се односе на димензије складишног простора, основне концепције и димензије регала, носивост и број блокова регала.

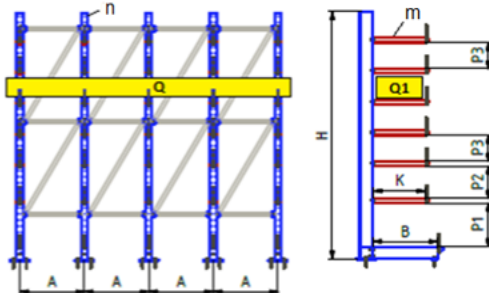
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	1. Tip konzolnog regala													
2	☒ Jednostrani ☐ Dvostrani													
3	2. Stub													
4	Visina stuba H (mm)	6000												
5	Broj stubova n	4												
6	Oсно растојanje A (mm)	1000												
7	3. Baza													
8	Dužina baze B (mm)	800												
9	4. Konzola													
10	Dužina konzole K (mm)	800												
11	Šupljina prvog nivoa P1 (mm)	1100												
12	Šupljina drugog nivoa P2 (mm)	1000												
13	Šupljina ostalih nivoa P3 (mm)	1000												
14	Broj konzola po stubu m	4												
15	5. Opterećenje													
16	Masa bunta Q (kg)	6000												
17	Opterećenje po konzoli Q1 (kg)	1500												
18	Opterećenje po stubu (kg)	6000												
19	6. Blok													
20	Broj blokova	1												
21	Rastoјanje između blokova (m)	2000												

Metod konzole
▼

Proračun

3D Model

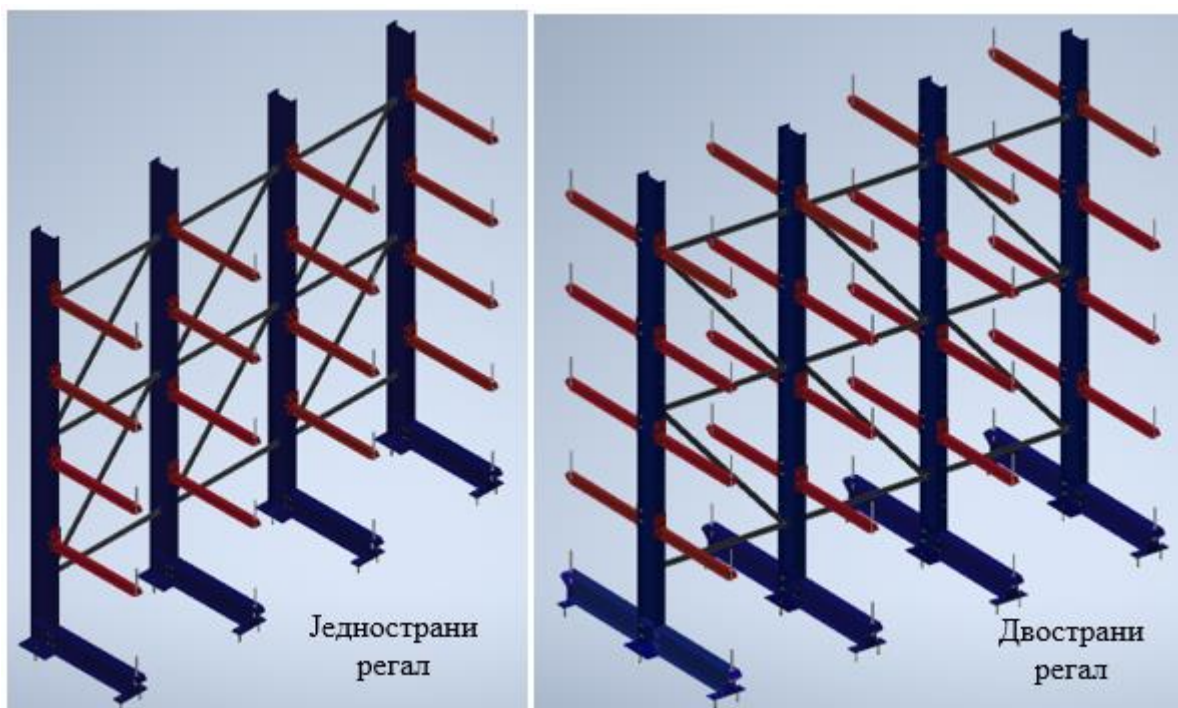
Dokumentacija



Слика 6 Пројектни задатак (упитник)

Према пројектном задатку, уносе се неопходни подаци за:

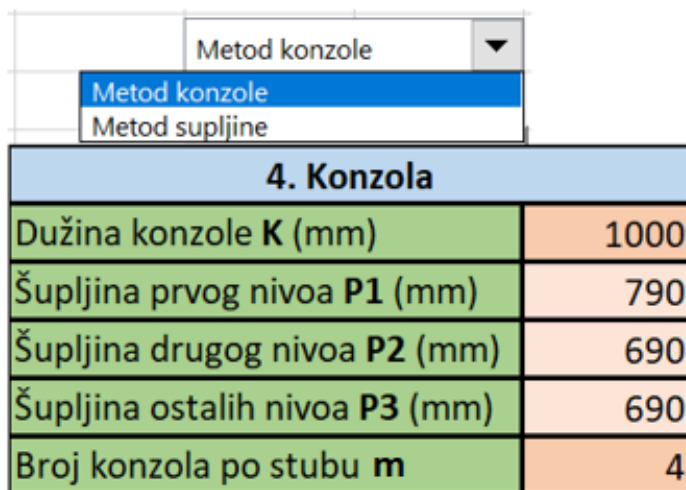
- **Тип конзолног регала** – корисник има могућност да изабере понуђену опцију једностраног или двостраног регала, слика 7;



Слика 7 Типови конзолног регала

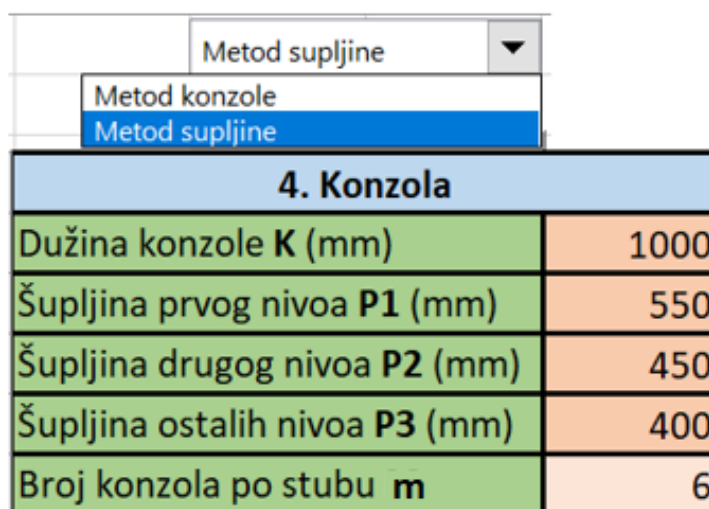
- **Стуб** – Корисник уноси жељену висину стуба (H), број стубова у једном блоку (n) и осно растојање између стубова у једном блоку (A), према расположивим димензијама простора;
- **Базу** – Корисник уноси жељену дужину базе (B);
- **Конзола** – Приликом попуњавања података везаних за конзолу, прво се уписује дужина конзоле (K), а затим корисник има избор да ли жели да упише број конзола

по стубу (m) или жели да упише растојање између базе и прве конзоле ($P1$), између прве и друге конзоле ($P2$) и између осталих конзола ($P3$). Растојања представљају чисте шупљине између конзола, односно између базе и прве конзоле. Избор жељене методе формирања распореда и броја конзола по стубу се врши преко падајућег менија који се налази поред упитника. Кликом на падајући мени, појавиће се две могућности: *Метод конзоле*, слика 8, или *Метод шупљине*, слика 9.



4. Konzola	
Dužina konzole K (mm)	1000
Šupljina prvog nivoa P1 (mm)	790
Šupljina drugog nivoa P2 (mm)	690
Šupljina ostalih nivoa P3 (mm)	690
Broj konzola po stubu m	4

Слика 8 Метод конзоле



4. Konzola	
Dužina konzole K (mm)	1000
Šupljina prvog nivoa P1 (mm)	550
Šupljina drugog nivoa P2 (mm)	450
Šupljina ostalih nivoa P3 (mm)	400
Broj konzola po stubu m	6

Слика 9 Метод шупљине

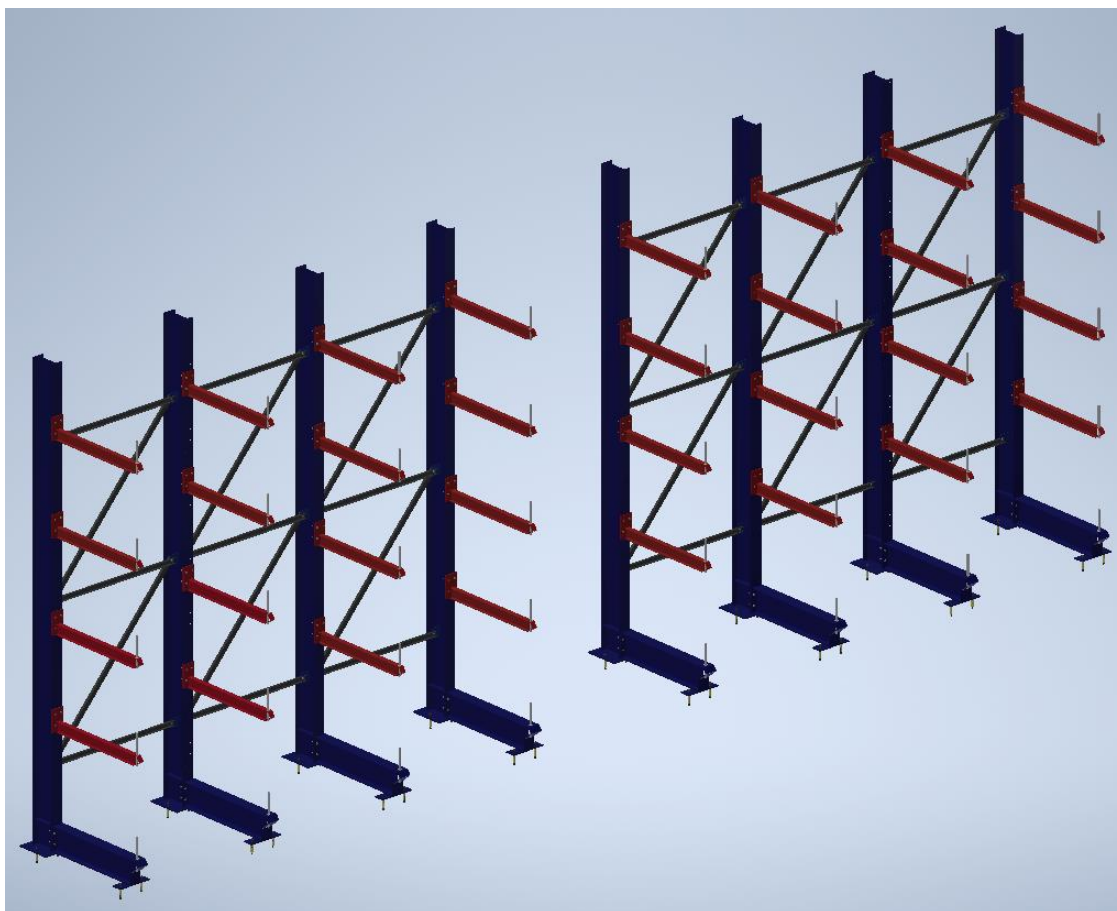
Уколико корисник изабере *Метод конзоле*, тада ће моћи да упише број конзола по стубу, а растојања између конзола ће бити аутоматски прорачуната, тако да буду једнака. Ако корисник изабере *Метод шупљине* тада ће моћи да упише растојања између конзола, а аутоматски ће бити израчунат број конзола који може да стане по једном стубу. Због усвојене перфорације стуба, често се може десити да се уписане вредности чистих шупљина у упитнику не поклапају са стварним вредностима шупљина у моделу, али ако се то догоди, стварне шупљине могу бити само веће од уписаних, што може бити предност јер се ствара више простора за складиштење.

- **Оптерећење** – Корисник уписује масу терета (Q) складишне јединице, која је изражена у килограмима. Након овога, аутоматски ће бити прорачунато оптерећење по конзоли и оптерећење по стубу и уписано у за то предвиђена поља, слика 10.

5. Opterećenje	
Masa bunta Q (kg)	6000
Opterećenje po konzoli Q_1 (kg)	1500
Opterećenje po stubu Q_2 (kg)	6000

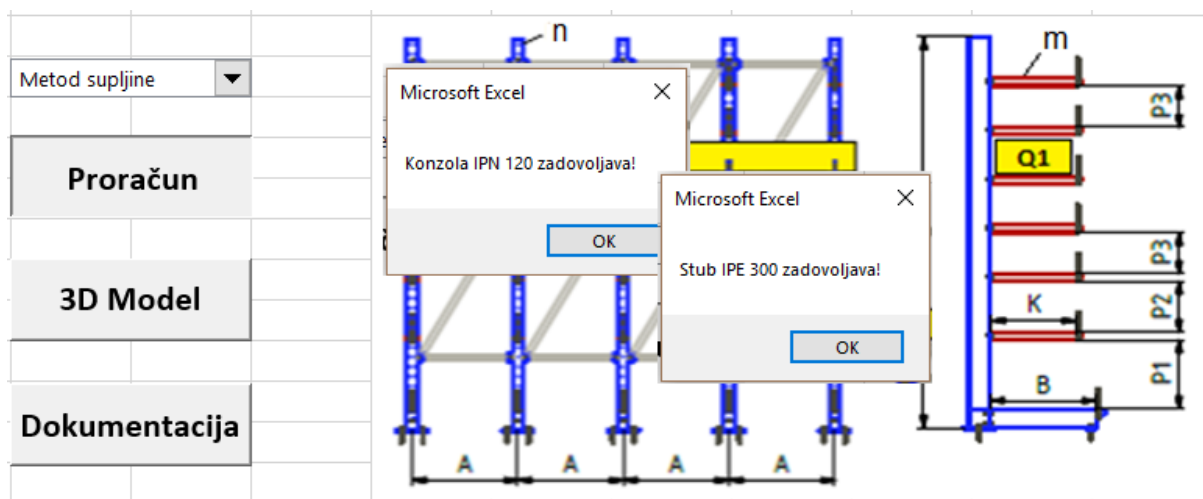
Слика 10 Поља за унос оптерећења

- **Блок** – Овде је потребно унети жељени број блокова, као и растојање између два блока. Један блок представља све стубове повезане укрућењима. Блокови углавном нису повезани укрућењима, мада могу бити. На слици 11 је приказан пример низа регала који се састоји из два блока.



Слика 11 Конзолни регал који се састоји из два блока

Након унетих свих тражених параметара, врши се прорачун. Поред упитника се налазе тастери *Proračun*, *3D model* и *Dokumentacija*. Избором опције *Proračun*, аутоматски ће се извршити избор профила за конзолу и стуб, а корисник ће на екрану добити поруку који су то профили, слика 12.



Слика 12 Изглед екрана након избора опције „Proračun“

Када се изврши прорачун, параметри за генерисање модела, слика 13, се аутоматски ажурирају, и тада је могуће формирати модел избором опције *3D model*, а затим и документацију кликом на дугме *Dokumentacija*.

	A	B	C	D
1	Konzola	Visina_konzole	120	mm
2		Sirina_konzole	58	mm
3		Debljina_rebra_konzole	5,1	mm
4		Debljina_nozice_konzole	7,7	mm
5		Poluprecnik_rebra_konzole	5,1	mm
6		Poluprecnik_nozice_konzole	3,1	mm
7		Duzina_konzole	1000	mm
8	Stub	Visina_stuba	300	mm
9		Sirina_stuba	150	mm
10		Debljina_rebra_suba	7,1	mm
11		Debljina_nozice_stuba	10,7	mm
12		Poluprecnik_rebra_suba	15	mm
13		Duzina_stuba	5000	mm
14	Perforacija stuba	Precnik_otvora	15	mm
15		Korak_perforacije	100	mm
16		Oсно_rastojanje_otvora	80	mm
17		Rastojanje_od_bocne_ivice	35	mm
18		Rastojanje_od_ceone_ivice	100	mm
19	Ceona ploca	Visina_ploce	240	mm
20		Sirina_ploce	150	mm
21		Debljina_ploce	20	mm
22	Perforacija ceone ploce	Precnik_otvora_ceone_ploce	15	mm
23		Oсно_rastojanje_otvora_ploce	80	mm
24		Rastojanje_od_bocne_ivice_ploce	35	mm
25		Rastojanje_od_ceone_ivice_ploce	30	mm
26		Korak_perforacije_ploce	100	mm
27	Baza	Visina_baze	300	mm
28		Sirina_baze	150	mm
29		Debljina_rebra_baze	7,1	mm
30		Debljina_nozice_baze	10,7	mm
31		Poluprecnik_rebra_baze	15	mm
32		Duzina_baze	800	mm

Слика 13 – Параметри за израду модела конзолног регала

33	Perforacije baze	Debljina_ploce_za_vezu_baze_i_stuba	11	mm
34		Precnik_otvora_za_vezu_baze_i_stuba	15	mm
35		Osno_rastojanje_otvora_baze_i_stuba	80	mm
36		Korak_otvora_baze_i_stuba	100	mm
37	Ploce baze	Sirina_prednje_ploce_baze	400	mm
38		Duzina_prednje_ploce_baze	100	mm
39		Debljina_prednje_ploce_baze	10	mm
40		Otvor_za_ankerisanje_prednje_ploce	18	mm
41		Osno_rastojanje_ozvora_za_ankerisanje_prednje_ploce	250	mm
42		Sirina_zadnje_ploce_baze	400	mm
43		Duzina_zadnje_ploce_baze	400	mm
44		Debljina_zadnje_ploce_baze	10	mm
45		Otvor_za_ankerisanje_zadnje_ploce	18	mm
46		Osno_rastojanje_ozvora_za_ankerisanje_zadnje_ploce	250	mm
47	Ukrucenja	Duzina_horizontalnog_ukrucenja	850	mm
48		Duzina_dijagonalnog_ukrucenja	1750	mm
49		Debljina_lima	3	mm
50		Sirina_ukrucenja	50	mm
51		Visina_ukrucenja	25	mm
52		Rastojanje_otvora_ukrucenja	25	mm
53	Ploce ukrucenja	Sirina_ploce_ukrucenja	100	mm
54		Duzina_ploce_ukrucenja	121	mm
55		Debljina_ploce_ukrucenja	5	mm
56		Otvor_ploce_ukrucenja	15	mm
57		Rastojanje_otvora_ploce_ukrucenja_od_ivice	25	mm
58		Dimenzija_oborene_ivice	20	mm
59	Zavrsetak konzole	Debljina_zavrsetka_konzole	4	mm
60		Sirina_zavrsetka_konzole	58	mm
61		Visina_zavrsetka_konzole	120	mm
62		Duzina_zavrsetka_konzole	75	mm
63		Precnik_otvora_zavrsetka	20	mm
64		Rastojanje_otvora_zavrsetka_konzole_od_ivice	20	mm
65	Zavrsetak baze	Debljina_zavrsetka_baze	5	mm
66		Sirina_zavrsetka_baze	150	mm
67		Visina_zavrsetka_baze	80	mm
68		Duzina_zavrsetka_baze	80	mm
69		Precnik_otvora_zavrsetka_baze	20	mm
70		Rastojanje_otvora_zavrsetka_baze_od_ivice	30	mm
71	Zavrtnjevi	Precnik_zavrtnja	14	mm
72		Duzina_zavrtnja	60	mm
73		Precnik_glave	21	mm
74		Duzina_glave	8,8	mm
75		Broj_zavrtnjeva	2	ul
76	Opste	Broj_konzola_po_stubu	4	ul
77		Korak_konzole	800	mm
78		Broj_stubova	3	ul
79		Broj_ukrucenja	2	ul
80		Broj_blokova	1	ul
81		Osno_rastojanje_stubova_pola	1000	mm
82		Osno_rastojanje_blokova	2000	mm
83		Osno_rastojanje_stubova	1000	mm
84		Precnik_podloske_s	28	mm
85		Precnik_podloske_u	15	mm
86		Debljina_podloske	2,5	mm
87		Vertikalni_broj_ukrucenja	2	ul

Слика 13 – Параметри за израду модела конзолног регала - наставак

3.3 Прорачун елемената конзолног регала

Како би прорачун елемената регала био аутоматски извршен, потребно је у програмском језику *VBA* исписати неопходне *кодове* за прорачун. За сваки елемент који се прорачунава формира се *масо* у који се уноси код. Кодовима је представљен аналитички прорачун помоћу одговарајућих наредби у *VBA*.

3.3.1 Прорачун конзоле према Еврокоду 3

Да би исписали *код*, прво је потребно размотрити који фактори утичу на правилан избор профила конзоле и извршити аналитички прорачун. Конзола је оптерећена само на савијање, па је као почетне параметре за прорачун неопходно познавати оптерећење, сопствену масу и дужину конзоле и на основу тога проверити који профил задовољава дефинисане параметре. Поред тога треба израчунати и да ли угиб изабране конзоле прелази дозвољену вредност. Уколико сви утицајни фактори задовољавају услове, профил се може усвојити.

Аналитички прорачун конзола подразумева да се прво дефинише број конзола на којима ће терет да лежи, па да се маса терета подели са дефинисаним бројем, како би се видело колико оптерећење делује на сваку конзолу. На масу терета треба додати и сопствену масу конзоле јер код великих профила маса конзоле може значајно утицати на избор конзоле.

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 [5].

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

$$V_{Sd} \leq V_{pl,Rd} = A_v(f_y/\sqrt{3}) / \gamma_{M0} \quad (1)$$

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, табела 6;

γ_{M0} - парцијални коефицијент сигурности за отпорност поречних пресека класе 1, 2 и 3, табела 7;

f_y - напон на граници развлачења, табела 8;

Површина смицања A_v зависи од типа попречног пресека и правца деловања смичуће силе. Упрошћено се може рећи да је то сума површина свих делова попречног пресека који су паралелни са правцем деловања смичуће силе. За карактеристичне попречне пресеке у табели 6 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:

$$A_{v,net} \geq (f_y/f_u) \cdot A_v \quad (2)$$

У супротном, отпорност на смицање треба да се одреди на основу редуковане површине смицања, која се одређује на основу следећег израза [5]:

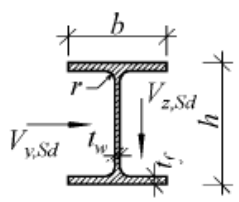
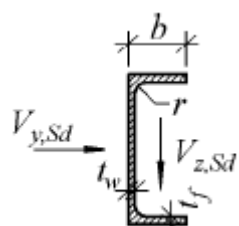
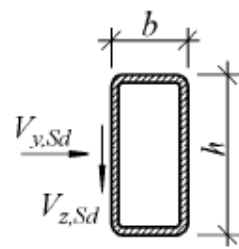
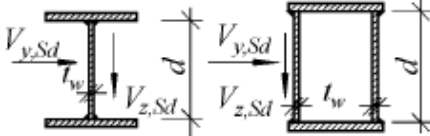
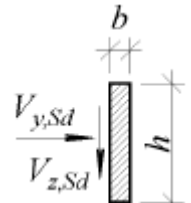
$$A_{v,red} \geq (f_y/f_u) \cdot A_{v,net} \quad (3)$$

где су:

$A_{v,net}$ – нето површина смицања;

$A_{v,red}$ – редукована површина смицања.

Табела 6 Површине смицања A_v [5]

Тип попречног пресека	Површина смицања	
	$A_{v,z}$	$A_{v,y}$
 Ваљани	$A - 2b \cdot t_f + (t_w + 2r) \cdot t_f$ или уопштено $1,04 \cdot h \cdot t_w$	$2b \cdot t_f$
 Ваљани	$A - 2b \cdot t_f + (t_w + 2r) \cdot t_f$	$2b \cdot t_f$
 Ваљани	$A \cdot h/(b+h)$	$A \cdot b/(b+h)$
 Заварени	$\sum(d \cdot t_w)$	$A - \sum(d \cdot t_w)$
	A	

Тип попречног пресека	Површина смицања	
	$A_{v,z}$	$A_{v,y}$
	$2A/\pi$	
A – Површина попречног пресека b – Ширина профила h – Висина профила d – Висина ребра	t_f – Дебљина ножице t_w – Дебљина ребра r – Полупречник заобљења вањаних профила	

У погледу момента савијања треба доказати да је у свим пресецима задовољен следећи услов [5]:

$$M_{Sd} \leq M_{c,Rd} \quad (4)$$

где су:

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

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

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 [5]:

$$M_{c,Rd} = W_{pl} \cdot f_y / \gamma_{M0} \quad \text{за попречне пресеке класе 1 и 2;} \quad (5)$$

$$M_{c,Rd} = W_{el} \cdot f_y / \gamma_{M0} \quad \text{за попречне пресеке класе 3;} \quad (6)$$

$$M_{c,Rd} = W_{eff} \cdot f_y / \gamma_{M1} \quad \text{за попречне пресеке класе 4;} \quad (7)$$

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 попречних пресека класе 1, 2 и 3, табела 7;

γ_{M1} - парцијални степен сигурности за отпорност попречних пресека класе 4, табела 7;

f_y - напон на граници развлачења, табела 8.

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

$$0,9 \cdot \frac{A_{f,net} \cdot f_y}{\gamma_{M2}} \geq \frac{A_f \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (8)$$

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:

$$M_{Sd} \leq M_{u,Rd} = W_{net} \cdot f_y / \gamma_{M2} \quad (9)$$

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:

$$A_{f,red} = A_f \cdot \frac{f_y}{f_u} \cdot \frac{\gamma_{M2}}{0,9 \cdot \gamma_{M0}} \quad (10)$$

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 (4) и смичуће силе (1) треба задовољити и следећи услов:

$$M_{Sd} \leq M_{V,Rd} \quad (11)$$

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:

$$M_{V,Rd} = (W_{pl} - \frac{\rho \cdot A_v^2}{4 \cdot t_w}) \cdot f_y / \gamma_{M0}, \quad \text{при чему је } M_{V,Sd} \leq M_{c,Rd}, \quad (12)$$

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

$$\rho = (2V_{Sd}/V_{pl,Rd} - 1)^2 \quad (13)$$

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 7 Парцијални коефицијенти сигурности за отпорност γ_M [5]

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-проклизивање	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 8 Номиналне вредности границе развлачења f_y и чврстоће на затезање f_u за конструкционе челике [5]

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

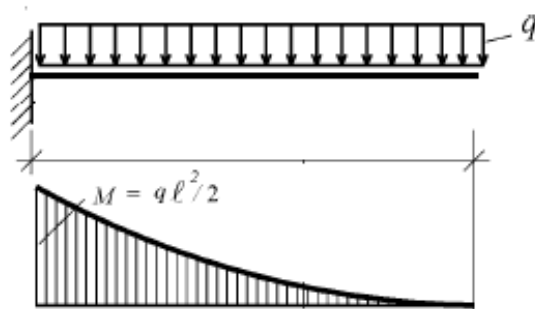
*) t је номинална дебљина елемента
 **) 63 mm за плоче и остале равне производе од челика

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 карактеристична репрезентативна вредност момента савијања у посматраном пресеку M_f може израчунати на следећи начин [6]:

$$M_f = \frac{F_q \cdot l}{2} \cdot [1 - (z/l)]^2 \quad (14)$$

Пошто је максимални момент код конзоле, како је приказано и на слици 14, у укљештењу, то значи да је $z = 0$, па се добија:

$$M_f = \frac{F_q \cdot l}{2} \quad (15)$$



Слика 14 Максимални момент за конзолу [5]

Ову вредност момента је потребно помножити одговарајућим коефицијентом сигурности за дејство да би се добила прорачунска вредност:

$$M_{sd} = \frac{F_q \cdot l}{2} \cdot \gamma_{G,sup} \quad (16)$$

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, табела 9;

Табела 9 Парцијални коефицијенти сигурности за дејства - гранична стања носивости [7]

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

Пошто се избор конзоле врши на основу отпорног момента, мора се извршити поређење отпорних момената профила конзоле и добијеног отпорног момента. Како конзоле припадају првој класи попречних пресека, за прорачун се узима пластични отпорни момент.

$$W_{pl} = (M_{sd} \cdot \gamma_{M0}) / f_y \quad (17)$$

$$W_{pl} = \left(\frac{F_q \cdot l}{2} \cdot \gamma_{G,sup} \cdot \gamma_{M0} \right) / f_y \quad (18)$$

Добијену вредност треба упоредити са пластичним отпорним моментима свих профила конзола, па се за профил конзоле узима онај чији је отпорни момент први већи од добијеног.

Према табелама 7 и 9, за парцијалне коефицијенте сигурности за дејства и отпорност, усвајају се следеће вредности:

$$\gamma_{M0} = 1,1 \quad (19)$$

$$\gamma_{G,sup} = 1,35 \quad (20)$$

У табели 10 је дат упоредни приказ носивости различитих профила, за различите дужине конзола. Извршено је поређење носивости које су дате у каталогу произвођача [8] и прорачунате вредности носивости методом допуштених напона и методом граничних стања.

Табела 10 Упоредни приказ носивости конзола

	L (mm)	Wy,pl (mm ³)	Wy,el (mm ³)	σ_{dop} (N/mm ²)	$M_{c,Rd}$ (Nmm)	Fq1 (kg)	Fq2 (kg)	Fq3 (kg)
IPN 80	400	22800	19500	156,6	4870909,09	1445	1556,42	1838,98
IPN 100	400	39800	34200	156,6	8502727,27	2415	2729,72	3210,15
IPN 80	600	22800	19500	156,6	4870909,09	1030	1037,61	1225,98
IPN 100	600	39800	34200	156,6	8502727,27	1755	1819,81	2140,10
IPN 120	600	63600	54700	156,6	13587272,73	2720	2910,64	3419,85
IPN 140	600	93400	81900	156,6	19953636,36	3035	4357,98	5022,24
IPN 80	800	22800	19500	156,6	4870909,09	810	778,21	919,49
IPN 100	800	39800	34200	156,6	8502727,27	1370	1364,86	1605,07
IPN 120	800	63600	54700	156,6	13587272,73	2150	2182,98	2564,89
IPN 140	800	93400	81900	156,6	19953636,36	3125	3268,48	3766,68
IPN 80	1000	22800	19500	156,6	4870909,09	640	622,56	735,59
IPN 100	1000	39800	34200	156,6	8502727,27	1120	1091,88	1284,06
IPN 120	1000	63600	54700	156,6	13587272,73	1755	1746,38	2051,91
IPN 140	1000	93400	81900	156,6	19953636,36	2585	2614,78	3013,34
IPN 80	1250	22800	19500	156,6	4870909,09	505	498,05	588,47
IPN 100	1250	39800	34200	156,6	8502727,27	885	873,51	1027,24
IPN 120	1250	63600	54700	156,6	13587272,73	1420	1397,10	1641,53
IPN 140	1250	93400	81900	156,6	19953636,36	2110	2091,83	2410,67
IPN 80	1500	22800	19500	156,6	4870909,09	380	415,04	490,39
IPN 100	1500	39800	34200	156,6	8502727,27	730	727,92	856,04
IPN 120	1500	63600	54700	156,6	13587272,73	1170	1164,25	1367,94
IPN 140	1500	93400	81900	156,6	19953636,36	1755	1743,19	2008,89
IPN 80	2000	22800	19500	156,6	4870909,09	215	311,28	367,79
IPN 100	2000	39800	34200	156,6	8502727,27	470	545,94	642,03
IPN 120	2000	63600	54700	156,6	13587272,73	850	873,19	1025,95
IPN 140	2000	93400	81900	156,6	19953636,36	1285	1307,39	1506,67
IPN 160	2000	136000	117000	156,6	29054545,45		1867,70	2193,87

У табели 10 са F_{q1} су означене вредности носивости које су дате у извору [8], са F_{q2} носивости које су прорачунате методом допуштених напона, а са F_{q3} носивости добијене методом граничних стања. Као што се види, носивости се за све три методе разликују, мада прорачун методом допуштених напона даје приближније резултате оним резултатима који су приказани у извору [8]. Резултати добијени методом граничних стања се нешто више разликују и дају знатно веће носивости конзола. Разлог овоме је што се при прорачуну методом граничних стања користи пластични отпорни момент.

На претходним странама је приказан поступак прорачуна конзола методом граничних стања. Применом ове методе добијају се знатно веће носивости конзола, а самим тим се постиже и значајна уштеда материјала. Поступак прорачуна методом допуштених напона није детаљно приказан, али су ради поређења, у претходној табели дати само резултати добијени овом методом.

Како би се извршио правилан избор конзоле, потребно је да одређени профил, поред носивости, задовољи још један услов, а то је да угиб конзоле не сме бити већи од дозвољене вредности, која се може одредити као $l/200$ према [2], где је l дужина конзоле. Угиб се може израчунати на следећи начин, према [6]:

$$f = \frac{F_q \cdot l^3}{8 \cdot B} = \frac{F_q \cdot l^3}{8 \cdot E \cdot I} \quad (21)$$

при чему мора бити задовољен услов:

$$f \leq l/200 \quad (22)$$

па је

$$\frac{F_q \cdot l^3}{8 \cdot E \cdot I} \leq l/200 \quad (23)$$

где су:

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

l - дужина конзоле;

B - савојна крутост;

E - модул еластичности;

I - момент инерције.

3.3.1.1 Код за прорачун конзоле у VBA

Када су размотрени сви утицајни фактори и дефинисани услови који треба да буду испуњени при прорачуну и избору конзоле, потребно је цео процес на неки начин аутоматизовати. Аутоматизација поступка ће бити остварена исписивањем *кода* у програмском језику VBA. *Код* се уноси у за то предвиђен *масро*, и представља претходно приказан аналитички прорачун записан помоћу одговарајућих наредби VBA. На слици 15 је приказан *код* за прорачун конзоле.

Алгоритам је написан тако да редом проверава која конзола ће задовољити све услове дефинисане прорачуном. Ти услови су да пластични отпорни момент профила конзоле буде већи од отпорног момента добијеног прорачуном и да угиб конзоле не пређе критичну вредност. Први профил конзоле који задовољи оба услова ће бити усвојен, а кориснику ће се на екрану појавити порука који је профил задовољио. Уколико услове не задовољи ниједан профил, корисник ће бити обавештен поруком „Конзола не задовољава“. Када је задовољавајући профил конзоле одабран, из базе података ће сви неопходни параметри тог профила за израду модела конзоле бити копирани у одговарајућу табелу, слика 16.

```

Sub konzola2()
Range("Parametri!c7").Value = Range("Upitnik2!b10").Value
Ugib = (Range("Upitnik2!B17") + 5.9 * Range("Upitnik2!b10") / 1000) * 9.81 * Range("Upitnik2!B10") *
Range("Upitnik2!B10") * Range("Upitnik2!B10") / 8 / 210000 / 778000
n = (Range("Upitnik2!b17") + 5.9 * Range("Upitnik2!b10") / 1000) * 9.81 * Range("Upitnik2!b10").Value * 1.35
* 1.1 / 470
If n <= 22800 And Ugib <= Range("Upitnik2!b10") / 200 Then
Range("Parametri!c1:c6").Value = Range("IPN!b2:b7").Value
MsgBox "Konzola IPN 80 zadovoljava!"
Elseif (Range("Upitnik2!b17") + 8.3 * Range("Upitnik2!b10") / 1000) * 9.81 * Range("Upitnik2!b10").Value *
1.35 * 1.1 / 470 <= 39800 And ((Range("Upitnik2!B17") + 8.3 * Range("Upitnik2!b10") / 1000) * 9.81 *
Range("Upitnik2!B10") * Range("Upitnik2!B10") * Range("Upitnik2!B10") / 8 / 210000 / 1710000) <=
Range("Upitnik2!b10") / 200 Then
Range("Parametri!c1:c6").Value = Range("IPN!c2:c7").Value
MsgBox "Konzola IPN 100 zadovoljava!"
Elseif (Range("Upitnik2!b17") + 11.1 * Range("Upitnik2!b10") / 1000) * 9.81 * Range("Upitnik2!b10").Value *
1.35 * 1.1 / 470 <= 63600 And ((Range("Upitnik2!B17") + 11.1 * Range("Upitnik2!b10") / 1000) * 9.81 *
Range("Upitnik2!B10") * Range("Upitnik2!B10") * Range("Upitnik2!B10") / 8 / 210000 / 3280000) <=
Range("Upitnik2!b10") / 200 Then
Range("Parametri!c1:c6").Value = Range("IPN!d2:d7").Value
MsgBox "Konzola IPN 120 zadovoljava!"
Elseif (Range("Upitnik2!b17") + 14.3 * Range("Upitnik2!b10") / 1000) * 9.81 * Range("Upitnik2!b10").Value *
1.35 * 1.1 / 470 <= 93400 And ((Range("Upitnik2!B17") + 14.3 * Range("Upitnik2!b10") / 1000) * 9.81 *
Range("Upitnik2!B10") * Range("Upitnik2!B10") * Range("Upitnik2!B10") / 8 / 210000 / 5730000) <=
Range("Upitnik2!b10") / 200 Then
Range("Parametri!c1:c6").Value = Range("IPN!e2:e7").Value
MsgBox "Konzola IPN 140 zadovoljava!"
Elseif (Range("Upitnik2!b17") + 17.9 * Range("Upitnik2!b10") / 1000) * 9.81 * Range("Upitnik2!b10").Value *
1.35 * 1.1 / 470 <= 136000 And ((Range("Upitnik2!B17") + 17.9 * Range("Upitnik2!b10") / 1000) * 9.81 *
Range("Upitnik2!B10") * Range("Upitnik2!B10") * Range("Upitnik2!B10") / 8 / 210000 / 9350000) <=
Range("Upitnik2!b10") / 200 Then
Range("Parametri!c1:c6").Value = Range("IPN!f2:f7").Value
MsgBox "Konzola IPN 160 zadovoljava!"
Else
MsgBox "Konzola ne zadovoljava!"
End If
End Sub

```

Слика 15 Код за прорачун конзоле

```
Elseif (Range("Upitnik2!b17") + 11.1 * Range("Upitnik2!b10") / 1000) * 9.81 * Range("Upitnik2!b10").Value * 1.35 * 1.1 / 470 <= 63600 And ((Range("Upitnik2!B17") + 11.1 * Range("Upitnik2!b10") / 1000) * 9.81 * Range("Upitnik2!B10") * Range("Upitnik2!B10") * Range("Upitnik2!B10") / 8 / 210000 / 3280000) <= Range("Upitnik2!b10") / 200 Then
Range("Parametri!c1:c6").Value = Range("IPN!d2:d7").Value
MsgBox "Konzola IPN 120 zadovoljava!"
```



	A	B	C	D	E	F
1	Velicina	IPN 80	IPN 100	IPN 120	IPN 140	IPN 160
2	Visina mm	80	100	120	140	160
3	Sirina mm	42	50	58	66	74
4	Debljina rebra mm	3,9	4,5	5,1	5,7	6,3
5	Debljina nozice mm	5,9	6,8	7,7	8,6	9,5
6	Poluprecnik rebra mm	3,9	4,5	5,1	5,7	6,3
7	Poluprecnik nozice mm	2,3	2,7	3,1	3,4	3,8



	A	B	C	D
1	Konzola	Visina_konzole	120	mm
2		Sirina_konzole	58	mm
3		Debljina_rebra_konzole	5,1	mm
4		Debljina_nozice_konzole	7,7	mm
5		Poluprecnik_rebra_konzole	5,1	mm
6		Poluprecnik_nozice_konzole	3,1	mm
7		Duzina_konzole	1500	mm

Слика 16 Параметри за израду модела конзоле

3.3.2 Прорачун стуба према Еврокоду 3

Као и код конзоле, прво је потребно да се размотри како је стуб оптерећен и извршити аналитички прорачун. Стуб представља најоптерећенији елемент конзолног регала јер истовремено трпи извијање и савијање, тако да се мора димензионисати на аксијалну силу, момент савијања и комбиновано дејсво. Као почетне параметре за прорачун потребно је познавати конфигурацију регала, висину стуба, број и распоред конзола на стубу, масу терета и дужину конзола.

Конзолни регал представља случај код кога се јавља степенаста промена нормалне силе дуж стубова. Прорачун стуба који се налази под утицајем нормалних сила чији се интензитет дуж осе штапа степенасто мења у границама од вредности N_{c1} до $\sum N_{c,i}$, изводи се као штап под утицајем непроменљиве нормалне редуковане силе $N_{c,Rd}$, са основним коефицијентом дужине извијања β , према слици 17. Величина $N_{c,Rd}$ је замењујућа редукована нормална сила којом се штап дужине l проверава на извијање. Замењујућа нормална сила се одређује на следећи начин [4]:

$$N_{c,Rd} = \sum_{i=1}^n N_{c,i} \cdot \alpha_i \quad (24)$$

где су:

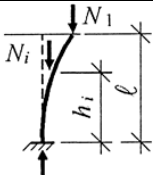
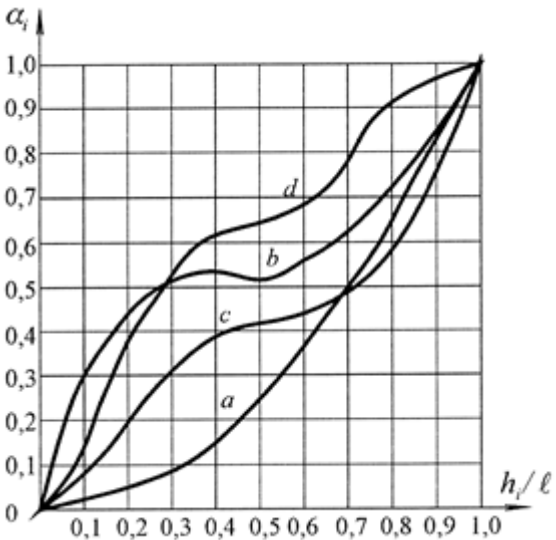
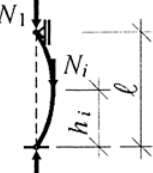
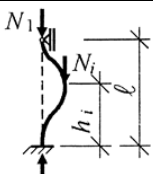
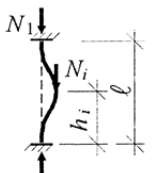
$N_{c,i}$ - спољашња нормална сила притиска која делује у тачки i ;

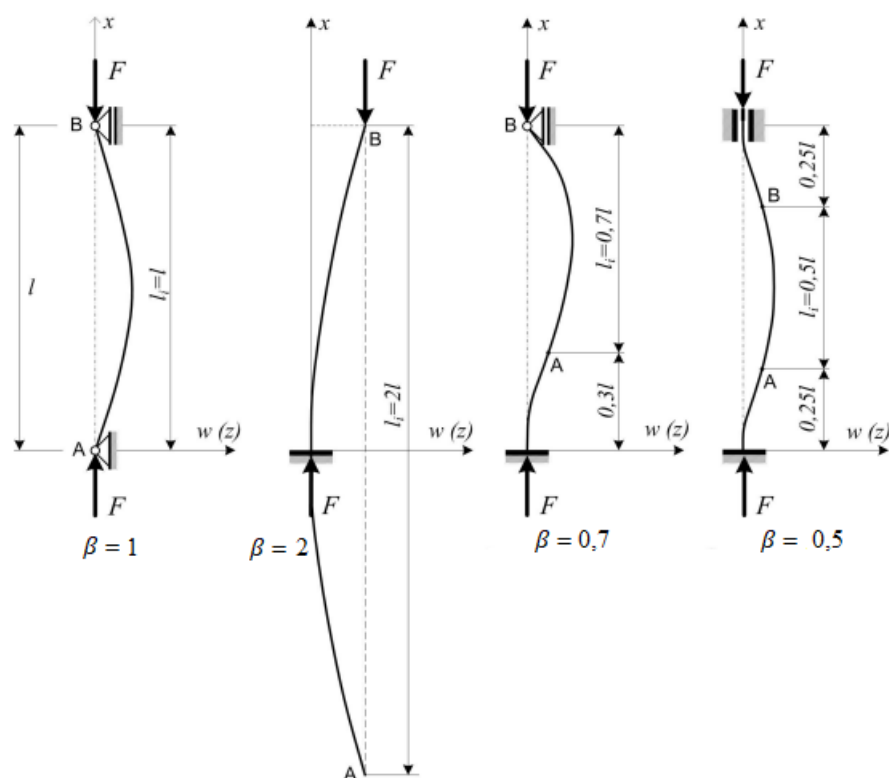
α_i - фактор редукције који зависи од положаја силе на штапу, начина ослањања и услова ослањања штапа h_i/l , табела 11;

h_i - растојање између места деловања силе и непокретног ослонца;

l - дужина стуба.

Табела 11 Одређивање фактора редуције [4]

Услови ослабања и оптерећења	Линија	Дијаграм α_i
	a	
	b	
	c	
	d	



Слика 17 Коефицијент дужине извијања β [4]

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). У инжењерској пракси се овакви елементи веома често срећу, посебно они који су оптерећени аксијалном силом притиска [5].

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 [5].

Код притиснутих елемената, због феномена извијања, осим провере отпорности попречног пресека, треба доказати и отпорност елемената на извијање. Дакле, треба проверити следећа два услова [5]:

$$N_{Sd} \leq N_{c,Rd} \quad (25)$$

и

$$N_{Sd} \leq N_{b,Rd} \quad (26)$$

где су:

N_{Sd} - прорачунска вредност силе притиска;

$N_{c,Rd}$ - прорачунска отпорност попречног пресека на притисак;

$N_{b,Rd}$ - прорачунска отпорност притиснутог елемента на извијање.

Прорачунска отпорност попречног пресека на притисак $N_{c,Rd}$ одређује се на следећи начин [5]:

$$N_{c,Rd} = A \cdot \frac{f_y}{\gamma_M}, \text{ за пресеке класе 1, 2, 3} \quad (27)$$

и

$$N_{c,Rd} = A_{eff} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}}, \text{ за пресеке класе 4} \quad (28)$$

где је A бруто површина попречног пресека, а A_{eff} површина ефективног попречног пресека.

Према Еврокоду, отпорност притиснутог елемента на извијање $N_{b,Rd}$ треба да се одреди на следећи начин:

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot \beta_A \cdot A \cdot \frac{f_y}{\gamma_M} \quad (29)$$

где су:

χ - редуccionи коефицијент извијања за разматрани вид извијања;

β_A - има вредност 1 за попречне пресеке класе 1, 2, 3, а за попречне пресеке класе 4 има вредност A/A_{eff} .

За елементе константног попречног пресека који су напрегнути константном аксијалном силом притиска, вредност редуccionог коефицијента извијања може се одредити на следећи начин [5]:

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}}, \text{ при чему је } \chi \leq 1, \text{ а} \quad (30)$$

$$\phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] \quad (31)$$

$$\bar{\lambda} = \left(\frac{\lambda}{\lambda_1}\right) \cdot \sqrt{\beta_A} \quad (32)$$

$$\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{E/f_y} = 93,9 \cdot \varepsilon \quad (33)$$

где су:

$\bar{\lambda}$ - бездимензиона виткост;

α - коефицијент имперфекције;

λ - виткост за релативни вид извијања;

λ_1 - виткост на граници развлачења;

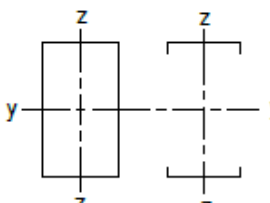
ε - коефицијент који зависи од врсте челика.

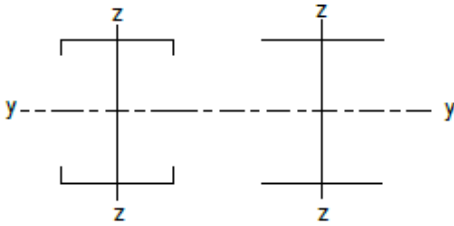
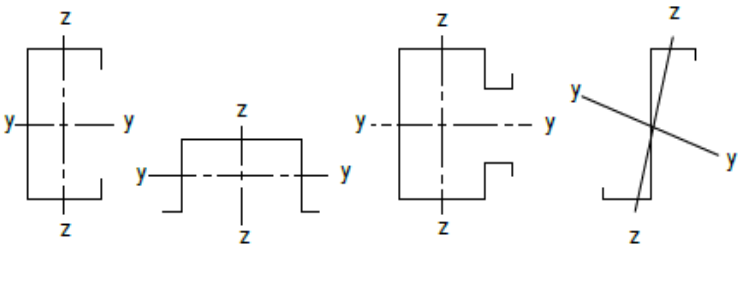
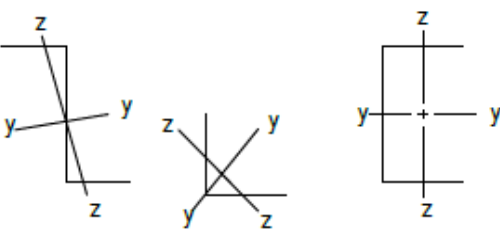
Избор криве извијања зависи од врсте и облика попречног пресека притиснутог елемента, дебљине лима и главне осе инерције око које се врши извијање. Вредности коефицијента импрефекције α за различите криве извијања су дате у табели 12 [2].

Табела 12 Вредности коефицијента имперфекције α

Крива извијања	a_0	a	b	c	d
Коефицијент имперфекције α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Табела 13 Коефицијент имперфекције α за различите попречне пресеке [2]

Врста попречног пресека		Извијање око	
		y-y	z-z
	Ако се користи f_{yb}	$\alpha = 0,34$	$\alpha = 0,34$
	Ако се користи f_{ya}	$\alpha = 0,49$	$\alpha = 0,49$

	$\alpha = 0,21$	$\alpha = 0,34$
	$\alpha = 0,34$	$\alpha = 0,34$
	$\alpha = 0,49$	$\alpha = 0,49$
НАПОМЕНА: За остале попречне пресеке који нису приказани у табели, α се може изабрати тако да одговара неком сличном приказаном попречном пресеку		

3.3.2.1 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 [5].

Када се примењује пластична анализа отпорности попречног пресека, Еврокод 3 прописује услове под којим не мора да се врши 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 [5]:

– за савијање I, H, ваљаних или заварених профила око јаче (y-y) осе инерције:

$$N_{Sd} \leq \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{N_{pl,Rd}}{4} \\ \frac{N_{pl,w,Rd}}{2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{d \cdot t_w \cdot f_{yw}}{\gamma_{M0}} \end{array} \right. \quad (34)$$

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

$$N_{Sd} \leq N_{pl,w,Rd} \quad (35)$$

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:

$$M_{Sd} \leq M_{N,Rd} \quad (36)$$

где су:

M_{Sd} - прорачунска вредност момента савијања;

$M_{N,Rd}$ - прорачунска вредност редуковане моментне отпорности, табела 14.

Изрази на основу којих се може одредити редукована моментна отпорност $M_{N,Rd}$ приказани су у табели 14 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 14 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 редукцију 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:

$$\sigma_{x,Ed} \leq f_{yd} = f_y / \gamma_{M0} \quad (37)$$

где је $\sigma_{x,Ed}$ прорачунска вредност максималног нормалног напона који се јавља у попречном пресеку, одређена на основу суперпозиције напона услед аксијалне силе и момената савијања, а f_{yd} прорачунска вредност границе развлачења.

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 [5]:

$$\frac{N_{Sd}}{A \cdot f_{yd}} + \frac{M_{y,Sd}}{W_{el,y} \cdot f_{yd}} + \frac{M_{z,Sd}}{W_{el,z} \cdot f_{yd}} \leq 1 \quad \text{за класу 3} \quad (38)$$

$$\frac{N_{Sd}}{A_{eff} \cdot f_{yd}} + \frac{M_{y,Sd} + N_{Sd} \cdot e_{Ny}}{W_{eff,y} \cdot f_{yd}} + \frac{M_{z,Sd} + N_{Sd} \cdot e_{Nz}}{W_{el,z} \cdot f_{yd}} \leq 1 \quad \text{за класу 4} \quad (39)$$

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).

Табела 14 Редукована моментна отпорност попречног пресека $M_{N,Rd}$ [5]

	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 $M_{Ny,Rd} = 1,11 \cdot M_{pl,y,Rd} \cdot (1-n) \leq M_{pl,y,Rd}$	$M_{Ny,Rd} = M_{pl,y,Rd} \frac{1-n}{1-0,5a_w} \leq M_{pl,y,Rd}$ 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 $n > 0,2$ $M_{Nz,Rd} = 1,56 \cdot M_{pl,z,Rd} (1-n) \cdot (n+0,6)$ - за $n \leq 0,2$ $M_{Nz,Rd} = M_{pl,z,Rd}$	$M_{Nz,Rd} = M_{pl,z,Rd} \frac{1-n}{1-0,5a_j} \leq M_{pl,z,Rd}$ 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 $\alpha = \beta = 1$)	
	$\alpha = 2\beta = 5n \geq 1$	$\alpha = \beta = \frac{1,66}{1 - 1,13 \cdot n^2}$ и $\alpha = \beta \leq 6$
$a = (A - 2 \cdot b \cdot t_f)/A \leq 0,5$ - за шупље профиле $n = N_{Sd}/N_{pl,Rd}$ $a_w = (A - 2 \cdot b \cdot t)/A \leq 0,5$ $M_{pl,y,Rd} = W_{pl,y} \cdot f_y/\gamma_{M0}$ $a_f = (A - 2 \cdot h \cdot t)/A \leq 0,5$ $M_{pl,y,Rd} = W_{pl,y} \cdot f_y/\gamma_{M0}$ - за сандучасте (заварене) профиле $a_w = (A - 2 \cdot b_f \cdot t_f)/A \leq 0,5$ $a_f = (A - 2 \cdot h \cdot t_w)/A$		

3.3.2.2 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 15 дате су интерактивне формуле за проверу отпорности елемената на комбиновано дејство силе притиска и момената савијања око обе главне осе инерције.

Табела 15 Интерактивне формуле за проверу отпорности комбиновано оптерећених елемената [5]

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 и μ_z 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 и k_z 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} и μ_{LT} као и код класе 1 и 2
	k_z и μ_z као у основном услову
Попречни пресеци класе 4	
Основни услов	$\frac{N_{sd}}{\chi_{min} \cdot A_{eff} \cdot f_y / \gamma_{M1}} + \frac{k_y \cdot (M_{y,sd} + N_{sd} \cdot e_{N,y})}{W_{eff,y} \cdot f_y / \gamma_{M1}} + \frac{k_z \cdot (M_{z,sd} + N_{sd} \cdot e_{N,z})}{W_{eff,z} \cdot f_y / \gamma_{M1}} \leq 1$
	$A_{eff}, W_{eff,y}, W_{eff,z}$ – карактеристике ефективног попречног пресека
	k_y, k_z, μ_y, μ_z 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	$\frac{N_{sd}}{\chi_z \cdot A_{eff} \cdot f_y / \gamma_{M1}} + \frac{k_{LT} \cdot (M_{y,sd} + N_{sd} \cdot e_{N,y})}{\chi_{LT} \cdot W_{eff,y} \cdot f_y / \gamma_{M1}} + \frac{k_z \cdot (M_{z,sd} + N_{sd} \cdot e_{N,z})}{W_{eff,z} \cdot f_y / \gamma_{M1}} \leq 1$
	k_z и μ_z као у основном услову
	k_{LT} и μ_{LT} 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 [5]:

$$\frac{N_{sd}}{\chi_y \cdot A \cdot f_y / \gamma_{M1}} + \frac{k_y \cdot M_{y,sd}}{W_{pl,y} \cdot f_y / \gamma_{M1}} \leq 1 \quad (40)$$

$$\frac{N_{sd}}{\chi_z \cdot A \cdot f_y / \gamma_{M1}} \leq 1 \quad (41)$$

- за бочно непридржане или торзионо осетљиве елементе:

$$\frac{N_{sd}}{\chi_z \cdot A \cdot f_y / \gamma_{M1}} + \frac{k_{LT} \cdot M_{y, sd}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl, y} \cdot f_y / \gamma_{M1}} \leq 1 \quad (42)$$

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 15;

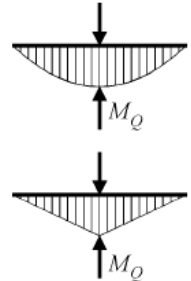
N_{sd} , $M_{y, sd}$ - прорачунске вредности утицаја.

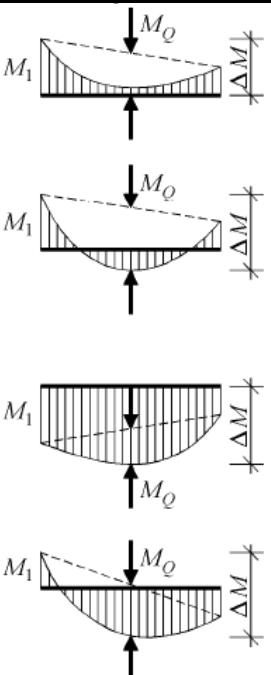
На сличан начин треба извршити модификацију интеракционих формула датих у табели 15 за остале класе попречних пресека.

Коефицијенти еквивалентног униформног момента β_M зависе од облика моментног дијаграма и треба да се одреде на основу израза датих у оквиру табеле 16, 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 16 Коефицијенти еквивалентног униформног момента [5]

Моментни дијаграм	Коефицијенти еквивалентног униформног момента β_M
Моменти на крајевима 	$\beta_{M\psi} = 1,8 - 0,7\psi$
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	$\beta_M = \beta_{M\psi} + \frac{M_Q}{\Delta M} (\beta_{MQ} - \beta_{M\psi})$ $M_Q = \max M$ само услед попречног оптерећења

Моментни дијаграм	Коефицијенти еквивалентног униформног момента β_M
	$\Delta M = \begin{cases} \max M & \text{за моментни дијаграм без промене знака} \\ \max M + \min M & \text{за моментни дијаграм са променом знака} \end{cases}$

3.3.2.3 Код за прорачун стуба у VBA

Као што је урађено за конзолу и за стуб је потребно унети *код* у VBA, како би се прорачун аутоматски вршио. *Код* се и овде исписује на основу претходно приказаног аналитичког прорачуна.

Пошто постоји могућност избора да се унесе број конзола по стубу па да размаци између конзола буду аутоматски израчунати, или да се унесу размаци па да број конзола буде аутоматски израчунат, потребно је исписати два одвојена *кода* за те две могућности. У суштини, *кодови* ће се разликовати само у почетку, односно при рачунању броја конзола или размака између конзола, као и приликом рачунања фактора редукције α_i .

Ако се унесу размаци између конзола па се добије број конзола по стубу, почетни део *кода* ће изгледати као на слици 18.

Да бисмо израчунали број конзола по стубу, потребно је од укупне дужине стуба одузети висине прва два нивоа (пошто се могу разликовати од осталих нивоа), а затим добијену вредност поделити са висином осталих нивоа. На добијени број конзола треба додати два због претходно одузета прва два нивоа. Ако тако добијени број није цео, потребно га је заокружити или на први мањи или на први већи број. На пример, ако се добијени број налази између 2 и 2,7 или 3 и 3,7 заокружује се на први мањи број односно на 2 или 3. А ако је број између 2,7 и 3 или 3,7 и 4 заокружује се на први већи број тј. на 3 или 4. Примењен је овакав начин заокруживања ради добијања оптималног броја конзола по стубу.

```

Sub stub2()
Dim i As Integer
Sum = 0
i = 0
'dejstva
brkonz = (Range("Upitnik2!B4") - 500 -
Application.WorksheetFunction.RoundUp((Range("Upitnik2!B11").Value + 2 * Range("Parametri!C1") +
Range("Upitnik2!B12")), -2)) / Application.WorksheetFunction.RoundUp((Range("Upitnik2!B13").Value +
Range("Parametri!C1")), -2) + 2
If ((brkonz >= 2 And brkonz <= 2.7) Or (brkonz >= 3 And brkonz <= 3.7) Or (brkonz >= 4 And brkonz <= 4.7) Or
(brkonz >= 5 And brkonz <= 5.7) Or (brkonz >= 6 And brkonz <= 6.7) Or (brkonz >= 7 And brkonz <= 7.7) Or
(brkonz >= 8 And brkonz <= 8.7) Or (brkonz >= 9 And brkonz <= 9.7) Or (brkonz >= 10 And brkonz <= 10.7) Or
(brkonz >= 11 And brkonz <= 11.7) Or (brkonz >= 12 And brkonz <= 12.7) Or (brkonz >= 13 And brkonz <=
13.7) Or (brkonz >= 14 And brkonz <= 14.7) Or (brkonz >= 15 And brkonz <= 15.7) Or (brkonz >= 16 And
brkonz <= 16.7)) Then
brkonz = Application.WorksheetFunction.RoundDown(brkonz, 0)
Else
brkonz = Application.WorksheetFunction.RoundUp(brkonz, 0)
End If
Range("Upitnik2!B14").Value = brkonz
    
```

Слика 18 Део кода за рачунање броја конзола по стубу

У случају да желимо да унесемо број конзола, а да програм израчуна размаке између нивоа, код ће изгледати као на слици 19.

```

Sub Metod_konzole()
Dim i As Integer
Sum = 0
i = 1
'dejstva
brkonz = Range("Upitnik2!B14")
Range("Upitnik2!B14").Value = brkonz
l = Range("Upitnik2!B4").Value
k = (l - 600) / brkonz
    
```

Слика 19 Део кода за рачунање величине растојања између конзола

Величина растојања између нивоа се рачуна тако што се дужина стуба умањена за висину профила базе и подели са бројем конзола.

Део кода за рачунање фактора редукције α_i је приказан на сликама 20 и 21. На слици 20 је приказан прорачун α_i за *Метод шупљине*, а на слици 21 за *Метод конзоле*.

```

Range("Upitnik2!B14").Value = brkonz
l = Range("Upitnik2!B4").Value
k = Range("Upitnik2!B13").Value + Range("Parametri!c1").Value
k1 = Range("Upitnik2!B11").Value + 300
k2 = Range("Upitnik2!B12").Value
    
```

Слика 20 Део кода за рачунање коефицијента редукције α_i за метод шупљине

```
'Visina prve
If ((i * k) + k1) / l < 0.05 Then
alfa1 = 0.001
Elseif ((i * k) + k1) / l > 0.05 And ((i * k) + k1) / l <= 0.1 Then
alfa1 = 0.02
Elseif ((i * k) + k1) / l > 0.1 And ((i * k) + k1) / l <= 0.15 Then
alfa1 = 0.03
Elseif ((i * k) + k1) / l > 0.15 And ((i * k) + k1) / l <= 0.2 Then
alfa1 = 0.05
Elseif ((i * k) + k1) / l > 0.2 And ((i * k) + k1) / l <= 0.25 Then
alfa1 = 0.07
Elseif ((i * k) + k1) / l > 0.25 And ((i * k) + k1) / l <= 0.3 Then
alfa1 = 0.09
Elseif ((i * k) + k1) / l > 0.3 And ((i * k) + k1) / l <= 0.35 Then
alfa1 = 0.13
Elseif ((i * k) + k1) / l > 0.35 And ((i * k) + k1) / l <= 0.4 Then
alfa1 = 0.15
Elseif ((i * k) + k1) / l > 0.4 And ((i * k) + k1) / l <= 0.45 Then
alfa1 = 0.2
Elseif ((i * k) + k1) / l > 0.45 And ((i * k) + k1) / l <= 0.5 Then
alfa1 = 0.25
Elseif ((i * k) + k1) / l > 0.5 And ((i * k) + k1) / l <= 0.55 Then
alfa1 = 0.3
Elseif ((i * k) + k1) / l > 0.55 And ((i * k) + k1) / l <= 0.6 Then
alfa1 = 0.37
Elseif ((i * k) + k1) / l > 0.6 And ((i * k) + k1) / l <= 0.65 Then
alfa1 = 0.45
Elseif ((i * k) + k1) / l > 0.65 And ((i * k) + k1) / l <= 0.7 Then
alfa1 = 0.5
Elseif ((i * k) + k1) / l > 0.7 And ((i * k) + k1) / l <= 0.75 Then
alfa1 = 0.57
Elseif ((i * k) + k1) / l > 0.75 And ((i * k) + k1) / l <= 0.8 Then
alfa1 = 0.65
Elseif ((i * k) + k1) / l > 0.8 And ((i * k) + k1) / l <= 0.85 Then
alfa1 = 0.75
Elseif ((i * k) + k1) / l > 0.85 And ((i * k) + k1) / l <= 0.9 Then
alfa1 = 0.85
Elseif ((i * k) + k1) / l > 0.9 And ((i * k) + k1) / l <= 0.95 Then
alfa1 = 0.94
Elseif ((i * k) + k1) / l > 0.95 And ((i * k) + k1) / l <= 1 Then
alfa1 = 1
End If
Sum = Sum + alfa1
```

Слика 20 Део кода за рачунање коефицијента редуције α_i за метод шупљине - наставак

```
'Visina druge
If (k2 + k1) / l < 0.05 Then
alfa1 = 0.001
Elseif (k2 + k1) / l > 0.05 And (k2 + k1) / l <= 0.1 Then
alfa1 = 0.02
Elseif (k2 + k1) / l > 0.1 And (k2 + k1) / l <= 0.15 Then
alfa1 = 0.03
Elseif (k2 + k1) / l > 0.15 And (k2 + k1) / l <= 0.2 Then
alfa1 = 0.05
Elseif (k2 + k1) / l > 0.2 And (k2 + k1) / l <= 0.25 Then
alfa1 = 0.07
Elseif (k2 + k1) / l > 0.25 And (k2 + k1) / l <= 0.3 Then
alfa1 = 0.09
Elseif (k2 + k1) / l > 0.3 And (k2 + k1) / l <= 0.35 Then
alfa1 = 0.13
Elseif (k2 + k1) / l > 0.35 And (k2 + k1) / l <= 0.4 Then
alfa1 = 0.15
Elseif (k2 + k1) / l > 0.4 And (k2 + k1) / l <= 0.45 Then
alfa1 = 0.2
Elseif (k2 + k1) / l > 0.45 And (k2 + k1) / l <= 0.5 Then
alfa1 = 0.25
Elseif (k2 + k1) / l > 0.5 And (k2 + k1) / l <= 0.55 Then
alfa1 = 0.3
Elseif (k2 + k1) / l > 0.55 And (k2 + k1) / l <= 0.6 Then
alfa1 = 0.37
Elseif (k2 + k1) / l > 0.6 And (k2 + k1) / l <= 0.65 Then
alfa1 = 0.45
Elseif (k2 + k1) / l > 0.65 And (k2 + k1) / l <= 0.7 Then
alfa1 = 0.5
Elseif (k2 + k1) / l > 0.7 And (k2 + k1) / l <= 0.75 Then
alfa1 = 0.57
Elseif (k2 + k1) / l > 0.75 And (k2 + k1) / l <= 0.8 Then
alfa1 = 0.65
Elseif (k2 + k1) / l > 0.8 And (k2 + k1) / l <= 0.85 Then
alfa1 = 0.75
Elseif (k2 + k1) / l > 0.85 And (k2 + k1) / l <= 0.9 Then
alfa1 = 0.85
Elseif (k2 + k1) / l > 0.9 And (k2 + k1) / l <= 0.95 Then
alfa1 = 0.94
Elseif (k2 + k1) / l > 0.95 And (k2 + k1) / l <= 1 Then
alfa1 = 1
End If
Sum = Sum+ alfa1
i = i + 1
```

Слика 20 Део кода за рачунање коефицијента редукције α_i за метод шупљине - наставак

```
'visina ostalih
Do While i <= brkonz - 2
If ((i * k) + k1 + k2) / l < 0.05 Then
alfa1 = 0.001
Elseif ((i * k) + k1 + k2) / l > 0.05 And ((i * k) + k1 + k2) / l <= 0.1 Then
alfa1 = 0.02
Elseif ((i * k) + k1 + k2) / l > 0.1 And ((i * k) + k1 + k2) / l <= 0.15 Then
alfa1 = 0.03
Elseif ((i * k) + k1 + k2) / l > 0.15 And ((i * k) + k1 + k2) / l <= 0.2 Then
alfa1 = 0.05
Elseif ((i * k) + k1 + k2) / l > 0.2 And ((i * k) + k1 + k2) / l <= 0.25 Then
alfa1 = 0.07
Elseif ((i * k) + k1 + k2) / l > 0.25 And ((i * k) + k1 + k2) / l <= 0.3 Then
alfa1 = 0.09
Elseif ((i * k) + k1 + k2) / l > 0.3 And ((i * k) + k1 + k2) / l <= 0.35 Then
alfa1 = 0.13
Elseif ((i * k) + k1 + k2) / l > 0.35 And ((i * k) + k1 + k2) / l <= 0.4 Then
alfa1 = 0.15
Elseif ((i * k) + k1 + k2) / l > 0.4 And ((i * k) + k1 + k2) / l <= 0.45 Then
alfa1 = 0.2
Elseif ((i * k) + k1 + k2) / l > 0.45 And ((i * k) + k1 + k2) / l <= 0.5 Then
alfa1 = 0.25
Elseif ((i * k) + k1 + k2) / l > 0.5 And ((i * k) + k1 + k2) / l <= 0.55 Then
alfa1 = 0.3
Elseif ((i * k) + k1 + k2) / l > 0.55 And ((i * k) + k1 + k2) / l <= 0.6 Then
alfa1 = 0.37
Elseif ((i * k) + k1 + k2) / l > 0.6 And ((i * k) + k1 + k2) / l <= 0.65 Then
alfa1 = 0.45
Elseif ((i * k) + k1 + k2) / l > 0.65 And ((i * k) + k1 + k2) / l <= 0.7 Then
alfa1 = 0.5
Elseif ((i * k) + k1 + k2) / l > 0.7 And ((i * k) + k1 + k2) / l <= 0.75 Then
alfa1 = 0.57
Elseif ((i * k) + k1 + k2) / l > 0.75 And ((i * k) + k1 + k2) / l <= 0.8 Then
alfa1 = 0.65
Elseif ((i * k) + k1 + k2) / l > 0.8 And ((i * k) + k1 + k2) / l <= 0.85 Then
alfa1 = 0.75
Elseif ((i * k) + k1 + k2) / l > 0.85 And ((i * k) + k1 + k2) / l <= 0.9 Then
alfa1 = 0.85
Elseif ((i * k) + k1 + k2) / l > 0.9 And ((i * k) + k1 + k2) / l <= 0.95 Then
alfa1 = 0.94
Elseif ((i * k) + k1 + k2) / l > 0.95 And ((i * k) + k1 + k2) / l <= 1 Then
alfa1 = 1
End If
Sum = Sum + alfa1
i = i + 1
Loop
```

Слика 20 Део кода за рачунање коефицијента редукције α_i за метод шупљине - наставак

```

l = Range("Upitnik2!B4").Value
k = (l - 600) / brkonz

Do While i <= brkonz
If ((i * k) + k1 + k2) / l < 0.05 Then
alfa1 = 0.001
Elseif ((i * k) + k1) / l > 0.05 And ((i * k) + k1) / l <= 0.1 Then
alfa1 = 0.02
Elseif ((i * k) + k1) / l > 0.1 And ((i * k) + k1) / l <= 0.15 Then
alfa1 = 0.03
Elseif ((i * k) + k1) / l > 0.15 And ((i * k) + k1) / l <= 0.2 Then
alfa1 = 0.05
Elseif ((i * k) + k1) / l > 0.2 And ((i * k) + k1) / l <= 0.25 Then
alfa1 = 0.07
Elseif ((i * k) + k1) / l > 0.25 And ((i * k) + k1) / l <= 0.3 Then
alfa1 = 0.09
Elseif ((i * k) + k1) / l > 0.3 And ((i * k) + k1) / l <= 0.35 Then
alfa1 = 0.13
Elseif ((i * k) + k1) / l > 0.35 And ((i * k) + k1) / l <= 0.4 Then
alfa1 = 0.15
Elseif ((i * k) + k1) / l > 0.4 And ((i * k) + k1) / l <= 0.45 Then
alfa1 = 0.2
Elseif ((i * k) + k1) / l > 0.45 And ((i * k) + k1) / l <= 0.5 Then
alfa1 = 0.25
Elseif ((i * k) + k1) / l > 0.5 And ((i * k) + k1) / l <= 0.55 Then
alfa1 = 0.3
Elseif ((i * k) + k1) / l > 0.55 And ((i * k) + k1) / l <= 0.6 Then
alfa1 = 0.37
Elseif ((i * k) + k1) / l > 0.6 And ((i * k) + k1) / l <= 0.65 Then
alfa1 = 0.45
Elseif ((i * k) + k1) / l > 0.65 And ((i * k) + k1) / l <= 0.7 Then
alfa1 = 0.5
Elseif ((i * k) + k1) / l > 0.7 And ((i * k) + k1) / l <= 0.75 Then
alfa1 = 0.57
Elseif ((i * k) + k1) / l > 0.75 And ((i * k) + k1) / l <= 0.8 Then
alfa1 = 0.65
Elseif ((i * k) + k1) / l > 0.8 And ((i * k) + k1) / l <= 0.85 Then
alfa1 = 0.75
Elseif ((i * k) + k1) / l > 0.85 And ((i * k) + k1) / l <= 0.9 Then
alfa1 = 0.85
Elseif ((i * k) + k1) / l > 0.9 And ((i * k) + k1) / l <= 0.95 Then
alfa1 = 0.94
Elseif ((i * k) + k1) / l > 0.95 And ((i * k) + k1) / l <= 1 Then
alfa1 = 1
End If

Sum = Sum + alfa1
i = i + 1
Loop

```

Слика 21 Део кода за рачунање коефицијента редукије α_i за метод конзоле

Остатак *кода* за прорачун стуба је исти за оба случаја, односно и за случај када се уноси број конзола по стубу и када се уносе вредности жељених размака између конзола.

Овај део *кода* је приказан на слици 22.

```
If Range("Parametri!C1").Value = 80 Then
m = Range("Upitnik2!B10").Value * 5.9 / 1000
Elseif Range("Parametri!C1").Value = 100 Then
m = Range("Upitnik2!B10").Value * 8.3 / 1000
Elseif Range("Parametri!C1").Value = 120 Then
m = Range("Upitnik2!B10").Value * 11.1 / 1000
Elseif Range("Parametri!C1").Value = 140 Then
m = Range("Upitnik2!B10").Value * 14.3 / 1000
Elseif Range("Parametri!C1").Value = 160 Then
m = Range("Upitnik2!B10").Value * 17.9 / 1000
End If
d_sila = Sum * (Range("Upitnik2!b17").Value + m) * 9.81 * 1.35
d_moment = Range("Upitnik2!b17").Value * Range("Upitnik2!b10").Value * 1.35 * 9.81 * brkonz / 2

'svojstva
j = 2
li = 2 * l
lambdz = li / Sheet9.Cells(21, j).Value
lambdredz = lambdz / 93.9
fiz = 0.5 * (1 + 0.34 * (lambdredz - 0.2) + lambdredz * lambdredz)
ksiz = 1 / (fiz + Sqr(fiz * fiz - lambdredz * lambdredz))
lambdy = li / Sheet9.Cells(16, j).Value
lambdredy = lambdy / 93.9
fiy = 0.5 * (1 + 0.21 * (lambdredy - 0.2) + lambdredy * lambdredy)
ksiy = 1 / (fiy + Sqr(fiy * fiy - lambdredy * lambdredy))
s_izvijanje = ksiz * Sheet9.Cells(7, j).Value * 235 / 1.1
s_pritisak = Sheet9.Cells(7, j).Value * 235 / 1.1
s_savijanje = Sheet9.Cells(15, j).Value * 235 / 1.1
odnos = d_sila * 1.1 / (Sheet9.Cells(7, j).Value * 235)
mnyrd = 1.11 * Sheet9.Cells(15, j).Value * 235 * (1 - odnos) / 1.1
milt = 0.15 * lambdredz * 1.1 - 0.15
kalt = 1 - (milt * d_sila / ksiz / Sheet9.Cells(7, j).Value / 235)
s_komb = (1.1 * d_sila) / (ksiz * Sheet9.Cells(7, j).Value * 235) + (kalt * 1.1 * d_moment) / (ksiy *
Sheet9.Cells(15, j).Value * 235)

'koji stub zadovoljava
If d_sila <= s_pritisak And d_sila <= s_izvijanje And d_moment <= s_savijanje And d_moment <= mnyrd And
milt <= 0.9 And kalt <= 1 And s_komb <= 1 Then
Range("Parametri!c8:c12").Value = Range("IPE!b2:b6").Value
MsgBox "Stub IPE 180 zadovoljava!"
Else
```

Слика 22 Део кода за избор профила стуба

Део *кода* приказан на слици 22 служи за одабир профила стуба. Као што је приказано и у аналитичком прорачуну, овде мора да буде испуњено седам услова:

$$1) N_{Sd} \leq N_{c,Rd}, \text{ односно} \quad (43)$$

$$\sum_{i=1}^n N_i \cdot \alpha_i \leq A \cdot \frac{f_y}{\gamma_M} \quad (44)$$

где су:

N_{sd} - дејство силе притиска;

$N_{c,Rd}$ - отпорност елемента на силу притиска;

N_i - спољашња нормална сила притиска која делује у тачки i ;

α_i - фактор редукције који зависи од начина ослањања и односа h_i/l , табела 11;

γ_M - парцијални степен сигурности за отпорност, табела 7;

f_y - напон на граници развлачења, табела 8;

h_i - растојање између места деловања силе и непокретног ослоња;

l - дужина штапа.

$$2) N_{sd} \leq N_{b,Rd}, \text{ односно} \quad (45)$$

$$\sum_{i=1}^n N_i \cdot \alpha_i \leq \chi \cdot \beta_A \cdot A \cdot \frac{f_y}{\gamma_M} \quad (46)$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \quad (47)$$

$$\phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] \quad (48)$$

$$\bar{\lambda} = \left(\frac{\lambda}{\lambda_1}\right) \cdot \sqrt{\beta_A} \quad (49)$$

$$\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{E/f_y} = 93,9 \cdot \varepsilon \quad (50)$$

$$\lambda = l_i/i \quad (51)$$

$$l_i = \beta \cdot L \quad (52)$$

где су:

N_{sd} - дејство силе притиска;

$N_{b,Rd}$ - отпорност елемента на извијање;

χ - редукциони коефицијент извијања за разматрани вид извијања;

β_A - има вредност 1 за попречне пресеке класе 1, 2, 3, а за попречне пресеке класе 4 има вредност A/A_{eff} ;

A - површина попречног пресека;

$\bar{\lambda}$ - бездимензиона виткост;

α - коефицијент имперфекције;

λ - виткост за релативни вид извијања;

λ_1 - виткост на граници развлачења;

ε - коефицијент који зависи од врсте челика;

i - радијус инерције;

β - коефицијент дужине извијања, слика 17.

$$3) M_{Sd} \leq M_{c,Rd}, \text{ односно} \quad (53)$$

$$n \cdot N_{Sd} \cdot \frac{l}{2} \cdot \gamma_g \leq W_{pl} \cdot \frac{f_y}{\gamma_M} \quad (54)$$

где су:

$M_{c,Rd}$ - отпорност елемента на момент савијања;

M_{Sd} - дејство момента савијања;

n - број конзола по стубу;

N_{Sd} - дејство силе притиска;

l - дужина конзоле;

γ_g - парцијални степен сигурности за дејства;

W_{pl} - пластични отпорни момент;

f_y - напон на граници развлачења.

$$4) M_{Sd} \leq M_{N,y,Rd}, \text{ односно} \quad (55)$$

$$n \cdot N_{Sd} \cdot \frac{l}{2} \cdot \gamma_g \leq 1,11 \cdot M_{pl,y,Rd} \cdot (1 - n) / \gamma_M \quad (56)$$

$$M_{pl,y,Rd} = W_{pl} \cdot \frac{f_y}{\gamma_M} \quad (57)$$

$$n = \frac{N_{Sd}}{N_{pl,Rd}} \quad (58)$$

где су:

M_{Sd} - дејство момента савијања;

$M_{N,y,Rd}$ - редукована моментна отпорност попречног пресека за y осу;

$M_{pl,y,Rd}$ - дејство момента савијања;

N_{Sd} - дејство силе притиска;

$N_{pl,Rd}$ - отпорност елемента на силу притиска.

$$5) \mu_{LT} \leq 0,9, \text{ односно} \quad (59)$$

$$0,15 \cdot \bar{\lambda}_z \cdot \beta_{M,LT} - 0,15 \leq 0,9 \quad (60)$$

где су:

μ_{LT} - коефицијент дат у оквиру табеле 15;

$\bar{\lambda}_z$ - бездимензиона виткост за z осу;

$\beta_{M,LT}$ - коефицијент еквивалентног униформног момента табела 16.

$$6) k_{LT} \leq 1 \quad (61)$$

$$1 - \frac{\mu_{LT} \cdot N_{sd}}{\chi_z \cdot A \cdot f_y} \leq 1 \quad (62)$$

где су:

k_{LT} - коефицијент дат у оквиру табеле 15;

χ_z - редукциони коефицијент извијања за z осу.

$$7) \frac{N_{sd}}{\chi_z \cdot A \cdot f_y / \gamma_M} + \frac{k_{LT} \cdot M_{y,sd}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_y / \gamma_M} \leq 1 \quad (63)$$

где су:

$M_{y,sd}$ - дејство момента савијања за y осу;

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

Код је написан тако да редом проверава приказане услове за сваки профил стуба, односно прво ће проверити за најмањи профил IPE 180. Уколико сви услови задовољавају, програм усваја најмањи профил. Ако макар један услов не задовољава, код прелази на следећи профил и тако редом док један од профила не задовољи све постављене услове. Након усвајања, корисник на екрану добија поруку који је профил одабран. Ако ниједан профил не испуњава све услове, појавиће се порука: „Стуб не задовољава“.

Као и код конзоле, када је одабран задовољавајући профил стуба, из базе података ће сви неопходни параметри тог профила за израду модела стуба бити копирани у одговарајућу табелу.

```
If d_sila <= s_pritisak And d_sila <= s_izvijanje And d_moment <= s_savijanje And d_moment <=
mnyrd And mlt <= 0.9 And kalt <= 1 And s_komb <= 1 Then
Range("Parametri!c8:c12").Value = Range("IPE!b2:b6").Value
MsgBox "Stub IPE 180 zadovoljava!"
Else
```

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Velicina	IPE 180	IPE 200	IPE 220	IPE 240	IPE 270	IPE 300	IPE 330	IPE 360	IPE 400
2	Visina mm	180	200	220	240	270	300	330	360	400
3	Sirina mm	91	100	110	120	135	150	160	170	180
4	Debljina rebra mm	5,3	5,6	5,9	6,2	6,6	7,1	7,5	8	8,6
5	Debljina nozice mm	8	8,5	9,2	9,8	10,2	10,7	11,5	12,7	13,5
6	Poluprecnik mm	9	12	12	15	15	15	18	18	21

8	Stub	Visina_stuba	300 mm
9		Sirina_stuba	150 mm
10		Debljina_rebra_suba	7,1 mm
11		Debljina_nozice_stuba	10,7 mm
12		Poluprecnik_rebra_suba	15 mm
13		Duzina_stuba	3800 mm

Слика 23 Параметри за израду модела стуба

3.3.3 Прорачун завртањске везе према Еврокоду 3

Веза између конзоле и стуба, као и базе и стуба је остварена завртњевима преко чеоног плоче. Завртњеви који се у овом случају користе су М12 и М14, одговарајуће класе чврстоће.

У зависности од оптерећења, дужине конзоле и величине завртња, веза између конзоле и стуба може бити остварена са 2 или 4 завртња. Њихов број је потребно одредити прорачунски. Број завртњева за везу базе и стуба се одређује конструктивно у зависности од величине профила базе и може износити 4, 6 или 8 завртњева.

Пошто је у овом случају завртањска веза конзоле и стуба оптерећена на комбинацију смицања и затезања, треба да буде задовољен следећи услов према табели 17 [9]:

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 \cdot F_{t,Rd}} \leq 1 \quad (64)$$

Овде је:

$F_{v,Ed}$ - сила смицања;

$F_{v,Rd}$ - носивост на смицање;

$F_{t,Ed}$ - затезна сила;

$F_{t,Rd}$ - носивост на затезање.

Сила смицања по једном завртњу се може одредити на следећи начин:

$$F_{v,Ed} = \frac{F_q}{n} \cdot \gamma_G \quad (65)$$

где су:

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

γ_G - вредност парцијалног степена сигурности за стална дејства;

n - број завртњева.

Затезна сила се одређује као:

$$F_{t,Ed} = \frac{M \cdot l_i}{\sum z_i \cdot l_i^2} \cdot \gamma_{G,sup}, \text{ при чему је} \quad (66)$$

$$M = F_q \cdot \left(\frac{l}{2} + b \right) \quad (67)$$

где су:

l_i - вертикална растојања од тачке превртања која се рачуна 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.

Носивост на смицање се одређује као:

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} \quad (68)$$

Овде је:

α_v - коефицијент који зависи од класе чврстоће, табела 17;

f_{ub} - затезна чврстоћа завртња;

A_s - површина испитног пресека завртња;

γ_{M2} - отпорност нето пресека код рупа за завртњеве.

Носивост на затезање може се одредити на следећи начин:

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} \quad (69)$$

где је:

k_2 - коефицијент који зависи од облика главе завртња, табела 17.

Табела 17 Прорачунска носивост појединачних спојних средстава на смицање и/или затезање [9]

Тип лома	Завртњеве	Закивци
Носивост на смицање за једну раван смицања	$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A}{\gamma_{M2}}$ - када раван смицања пролази кроз део завртња са навојем (А је површина испитног пресека завртња A_s): - за класе чврстоће 4.6, 5.6 и 8.8 $\alpha_v = 0,6$ - за класе чврстоће 4.8, 5.8 и 6.8 и 10.9 $\alpha_v = 0,6$ - када раван смицања не пролази кроз део завртња са навојем (А је површина бруто пресека завртња A_s): $\alpha_v = 0,6$	$F_{v,Rd} = \frac{0,6 \cdot f_{ur} \cdot A_0}{\gamma_{M2}}$
Носивост на притисак по омотачу рупе ¹⁾²⁾³⁾	$F_{v,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}}$ где је α_b мања од α_d, f_{ub}/f_u или 1, 0; У правцу преношења оптерећења: - за завртњеве у крајњим редовима: $\alpha_d = \frac{e_1}{3d_0}$ - за завртњеве у унутрашњим редовима: $\alpha_d = \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}$ Управно на правац преношења силе: - за завртњеве у ивичним редовима k_1 је мања вредност од: $2,8 \frac{e_1}{d_0} - 1,7 \text{ или } 2,5$ - за завртњеве у унутрашњим редовима k_1 је мања вредност од: $1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7 \text{ или } 2,5$	

Носивост на затезање ²⁾	$F_{t,Rd} = \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$ $k_2 = 0,63 \quad \text{за завртњеве са упуштеном главом,}$ $k_2 = 0,9 \quad \text{у осталим случајевима}$	$F_{t,Rd} = \frac{0,6 \cdot f_{ur} \cdot A_0}{\gamma_{M2}}$
Носивост на пробијање смицањем	$B_{p,Rd} = 0,6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_p \cdot f_u / \gamma_{M2}$	Провера није потребна
Комбиновано смицање и затезање	$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 \cdot F_{t,Rd}} \leq 1$	

¹⁾ Носивост на притисак по омотачу рупе $F_{b,Rd}$ за завртњеве:

- у рупама са великим зазором је 0,8 пута носивост на притисак по омотачу рупе за завртњеве у нормалним рупама;
- у овалним рупама, када је подужна оса рупе управна на правац преношења силе је 0,6 пута носивост на притисак по омотачу рупе за завртњеве у нормалним рупама.

²⁾ За завртњеве са упуштеном главом:

- носивост на притисак по омотачу рупе $F_{b,Rd}$ треба да се заснива на дебљини лима t која је једнака дебљини спојног лима минус половина дубине упуштања.
- при одређивању носивости на затезање $F_{t,Rd}$ угао и дубина упуштања треба да буду у сагласности са 1.2.4 [9]. Референтни стандарди: Група 4, у супротном носивости на затезање $F_{t,Rd}$ треба да буду прилагођене на одговарајући начин.

³⁾ Када оптерећење које делује на завртањ није паралелно са ивицом, носивост на притисак по омотачу рупе може да се провери појединачно за паралелну и управну компоненту оптерећења.

3.3.3.1 Аутоматизација прорачуна завртањске везе

Аутоматизација прорачуна завртањске везе није остварена исписивањем кода у VBA, као за остале елементе, већ је извршена директно у Excel-у. Циљ је био одредити да ли је за везу између конзоле и стуба потребно 2 или 4 завртња и који су то завртњеви (M12 или M14). Прорачун завртањске везе у Excel-у је приказан на слици 24.

Да би прорачун био извршен потребно је у пројектни задатак унети масу терета које носе конзоле и дужину конзола. За прорачун је неопходно познавати и профиле конзола који се користе, на основу чега ће бити одређен пречник завртња као и класа завртња. Профил конзоле је добијен у претходном прорачуну конзоле и аутоматски се ажурира приликом клика на дугме *Proračun*. Прорачун за везу завртњевима је извршен за случај када смицајна равна пролази кроз навој и када не пролази кроз навој, односно када је веза остварена завртњевима са навојем по целој дужини и са навојем које није по целој дужини завртња. У пракси се најчешће користе завртњеви са навојем по целој дужини, тако да се за коначан број завртњева увек користи број завртњева добијен за случај смицања кроз навој.

Након прорачуна, добијени подаци се аутоматски исписују у параметрима, што је приказано на слици 25.

	A	B
1	Klasa zavrtnja	8,8
2	Zatezna čvrstoća <i>fub</i>	800
3	α_v za smicanje kroz navoj	0,6
4	α_v za smicanje koje ne prolazi kroz navoj	0,6
5	γ_{M2}	1,25
6	Vrsta zavrtnja (navoj po celoj dužini ili ne)	1
7	Veličina zavrtnja	M14
8	Površina A	153,9
9	Površina As	115
10	Prečnik d0	15
11	k2	0,9
12	$F_{v,Rd}$ za smicanje kroz navoj	44,16
13	$F_{v,Rd}$ za smicanje koje ne prolazi kroz navoj	59,0976
14	$F_{t,Rd}$	66,24
15		
16	Maksimalna nosivost konzole	1666,667
17	Ivično rastojenje e1	30
18	Razmak između zavrtnjeva p1	100
19	Profil	IPN 120
20	Visina p.p. Profila IPN h	120
21	Položaj tačke prevrtanja a	30
22	Duzina konzole l	1000
23	Debljina ploče	20
24	Broj zavrtnjeva u jednom redu zi	2
25	Rastojanje od tačke prevrtanja l1 za 2 zavrtnja	60
26	Rastojanje od tačke prevrtanja l1 za 4 zavrtnja	160
27	Rastojanje od tačke prevrtanja l2 za 4 zavrtnja	60
28	$F_{t,Ed}$ za 2 zavrtnja	95,6475
29	$F_{t,Ed}$ za 4 zavrtnja	31,44575
30	$F_{v,Ed}$ za 2 zavrtnja	11,03625
31	$F_{v,Ed}$ za 4 zavrtnja	5,518125
32		
33	Broj zavrtnjeva za smicanje kroz navoj	4
34	Broj zavrtnjeva za smicanje koje ne prolazi kroz navoj	4
35		
36	Konačan broj zavrtnjeva	4

Слика 24 Код за прорачун завртањске везе

71	Zavrtnjevi	Precnik_zavrtnja	14 mm
72		Duzina_zavrtnja	60 mm
73		Precnik_glave	21 mm
74		Duzina_glave	8,8 mm
75		Broj_zavrtnjeva	2 ul

Слика 25 Параметри за израду модела завртњева

3.3.4 Учитавање кодова

Да би прорачун био правилно извршен и да не би дошло до грешака, потребно је да *кодови* буду прочитани правилним редоследом. То је потребно дефинисати у VBA посебним *кодом* као што је приказано на слици 26.

```
Sub Button5_Click()  
If Range("Broj_stubova!A20") = 1 Then  
Range("Upitnik2!B11:B13").Interior.Color = RGB(252, 228, 214)  
Range("Upitnik2!B14").Interior.Color = RGB(248, 203, 173)  
Call konzola2  
Call Metod_konzole  
Call Ostali_parametri2  
Else  
Range("Upitnik2!B11:B13").Interior.Color = RGB(248, 203, 173)  
Range("Upitnik2!B14").Interior.Color = RGB(252, 228, 214)  
Call konzola2  
Call stub2  
Call Ostali_parametri2  
End If  
End Sub
```

Слика 26 Дефинисање редоследа читања кодова

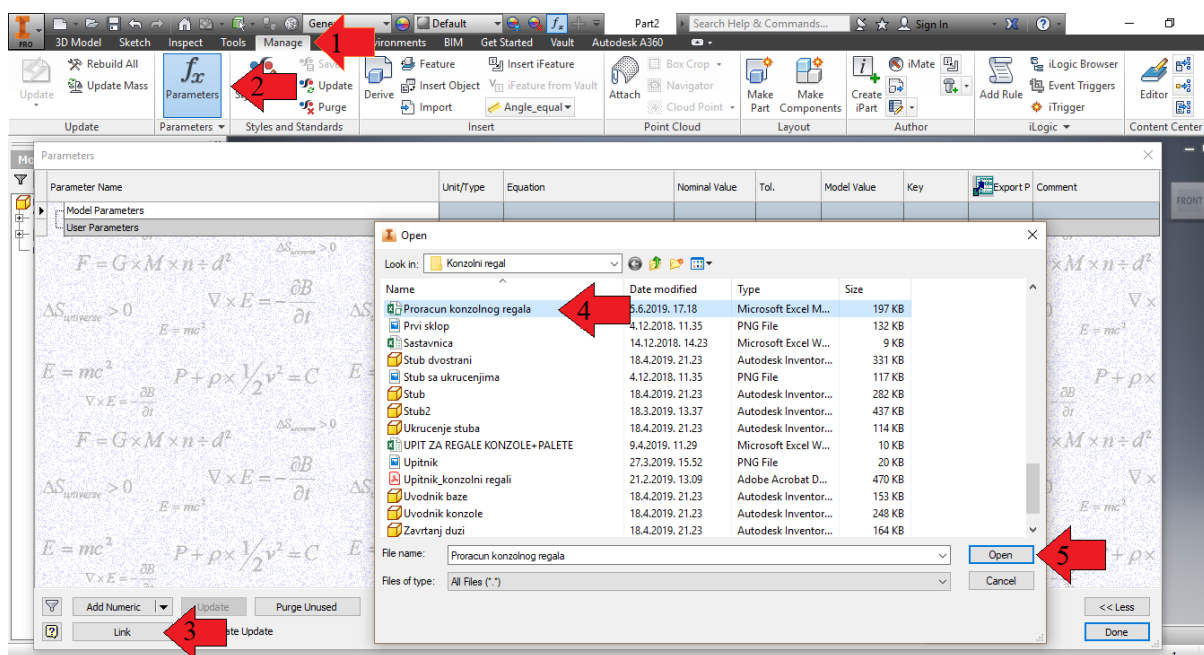
Како би прорачун правилно функционисао, неопходно је да *кодови* буду прочитани следећим редоследом:

1. *Код* за конзолу
2. *Код* за стуб
3. *Код* за остале елементе конзолног регала (овај код се односи на елементе регала који се не прорачунавају, већ се усвајају конструктивно или се њихов избор врши на основу искуства, као и на одређене односе између елемената).

Због разлика у *кодovima* при прорачуну стуба (*метод конзоле* или *метод шупљине*) потребно је поставити услов који ће да одреди који *код* ће да буде прочитан. Услов је постављен према томе да ли је у упитнику изабран *метод конзоле* или *метод шупљине*.

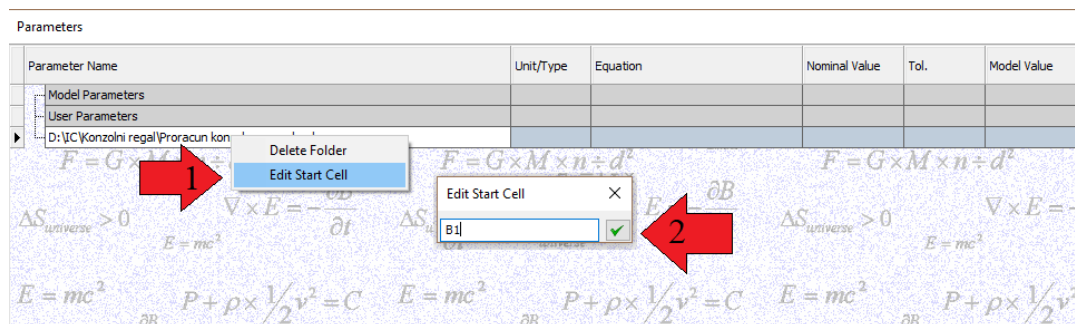
4. Поступак генерисања модела

Након извршеног прорачуна свих елемената конзолног регала, односно прорачуна стубова, конзола, и завртањске везе између њих и дефинисања свих потребних параметара за ове и елементе који се усвајају конструктивно, могуће је генерисати модел у програму за 3Д моделирање, *Autodesk Inventor* [10]. Да би се модел успешно генерисао, потребно је добијене параметре из *Excel*-а, приказане на слици 13, повезати са *Inventor*-ом. Параметри морају бити повезани приликом моделирања сваког појединачног елемента. Повезивање се врши тако што се у *Inventor*-у изабере опција *Parameters* у модулу *Manage*. При овоме се отвара прозор где је потребно кликнути на дугме *Link*, након чега се отвара нови прозор где треба пронаћи *Excel* фајл у коме се налазе тражени параметри, па кликнути на *Open*, слика 27.



Слика 27 Повезивање параметара – одабир *Excel* фајла

После овога појавиће се линк који показује адресу где се налази *Excel* фајл са параметрима. Десним кликом на овај линк, а затим кликом на *Edit Start Cell*, може се дефинисати ћелија која означава почетни параметар од кога креће повезивање свих осталих параметара, слика 28.



Слика 28 Повезивање параметара – дефинисање почетног параметра

Када се изврше сви описани кораци, појавиће се потребни параметри, слика 29, дефинисани у *Excel* табели, слика 13, након чега је потребно кликнути на дугме *Done* чиме се потврђује повезивање параметара.

Parameter Name	Unit/Type	Equation	Nominal Value	Tol.	Model Value	Key	Export	Comment
Model Parameters								
User Parameters								
D:\C\Konzolni regal\Proracun konzolnog regala.xlsx								
Visina_prve_rupe_stuba	mm	35 mm	35,000000	0	35,000000			
Broj_zavrtnjeva_baze	ul	3 ul	3,000000	0	3,000000			
Korak_druge_konzole	mm	900 mm	900,000000	0	900,000000			
Korak_prve_konzole	mm	1200 mm	1200,000000	0	1200,000000			
Broj_zavrtnjeva	ul	2 ul	2,000000	0	2,000000			
Vertikalni_broj_ukrucenja	ul	2 ul	2,000000	0	2,000000			
Broj_blokova	ul	1 ul	1,000000	0	1,000000			
Debljina_ukrucenja_stuba	mm	10 mm	10,000000	0	10,000000			
Duzina_ravnog_dela_zavrsetka_baze	mm	60 mm	60,000000	0	60,000000			
Duzina_granicnika_gornja	mm	200 mm	200,000000	0	200,000000			
Precnik_podlozke_s	mm	28 mm	28,000000	0	28,000000			
Broj_ukrucenja	ul	3 ul	3,000000	0	3,000000			
Precnik_granicnika	mm	20 mm	20,000000	0	20,000000			
Precnik_podlozke_u	mm	15 mm	15,000000	0	15,000000			
Duzina_granicnika_donja	mm	120 mm	120,000000	0	120,000000			
Duzina_ravnog_dela_zavrsetka_konzole	mm	40 mm	40,000000	0	40,000000			
Oсно_rastojanje_blokova	mm	2000 mm	2000,000000	0	2000,000000			
Oсно_rastojanje_stubova	mm	1500 mm	1500,000000	0	1500,000000			
Oсно_rastojanje_stubova_pola	mm	1000 mm	1000,000000	0	1000,000000			
Dublina_nosilodive	mm	25 mm	25,000000	0	25,000000			

Слика 29 Параметри у Inventor-у повезани са Excel-ом

Сада треба прећи на моделирање сваког елемента конзолног регала, а затим и на њихово склапање уз дефинисање свих односа између елемената. Потребно је направити два одвојена склопа за једнострани и двострани регал. Након овога треба омогућити да се модел аутоматски генерише и ажурира према дефинисаним параметрима. Ово се врши кликом на дугме *3D model* у упитнику програма, слика 30.

1. Tip konzolnog regala	
☒ Jedнострани	☐ Dvострани

2. Stub	
Visina stuba H (mm)	4500
Broj stubova N	4
Oсно_rastojanje A (mm)	1500

3. Baza	
Dužina baze B (mm)	1000

4. Konzola	
Dužina konzole K (mm)	1000
Šupljina prvog nivoa P1 (mm)	790
Šupljina drugog nivoa P2 (mm)	690
Šupljina ostalih nivoa P3 (mm)	690
Broj konzola po stubu M	4

Metod konzole

Proracun

3D Model

Dokumentacija

Слика 30 Дугме *3D model* за аутоматско генерисање модела регала

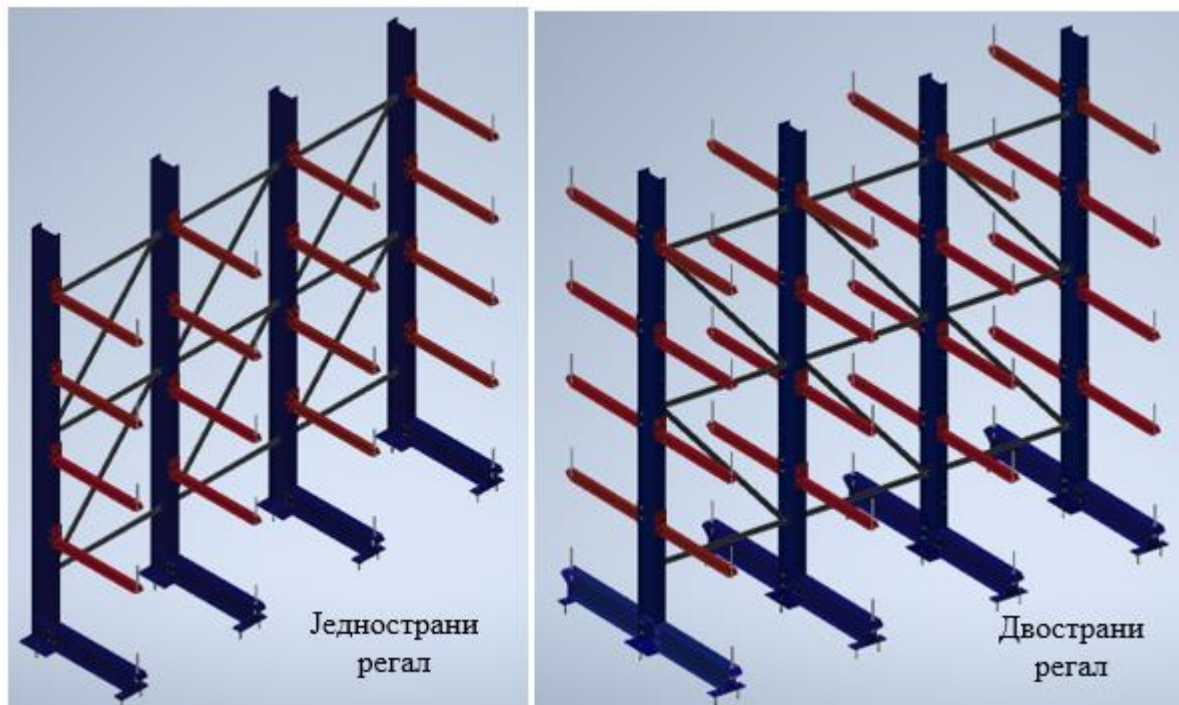
Пре овога је неопходно у коду дефинисати адресу са које ће се отворити модел регала. Код је приказан на слици 31. Постављен је услов према томе да ли је у упитнику изабрана опција за једнострани или двострани регал, па се према томе бира модел регала једностране или двостране концепције. Уколико се деси да последња конзола прелази висину стуба, након клика на дугме *3D model*, кориснику ће изаћи порука: „Последња конзола прелази висину стуба! Пробати са другом конфигурацијом!“, и тада није могуће отворити модел.

```

Private Sub Button6_Click()
If Range("Parametri!C8") < 270 Then
n = Range("Parametri!C13").Value - (Range("Parametri!C8").Value - 100) / 2 - Range("Parametri!C94").Value - Range("Parametri!C95").Value - (Range("Upitnik2!B14").Value - 2) * Range("Parametri!C77").Value - 130
Elseif Range("Parametri!C8") >= 270 And Range("Parametri!C8") < 360 Then
n = Range("Parametri!C13").Value - (Range("Parametri!C8").Value - 200) / 2 - Range("Parametri!C94").Value - Range("Parametri!C95").Value - (Range("Upitnik2!B14").Value - 2) * Range("Parametri!C77").Value - 130
Else
n = Range("Parametri!C13").Value - (Range("Parametri!C8").Value - 300) / 2 - Range("Parametri!C94").Value - Range("Parametri!C95").Value - (Range("Upitnik2!B14").Value - 2) * Range("Parametri!C77").Value - 130
End If
If n < 0 Then
MsgBox "Poslednja konzola prelazi visinu stuba! Probati sa drugom konfiguracijom!"
Else
If Sheet15.OptionButton1.Value = True Then
CreateObject("Shell.Application").Open ("D:\IC\Konzolni regal\Konzolni regal2.iam")
Else
CreateObject("Shell.Application").Open ("D:\IC\Konzolni regal\Dvostrani regal.iam")
End If
End If
End Sub
    
```

Слика 31 Код за аутоматско генерисање модела регала

Генерисани модели једностраног и двостраног регала су приказани на слици 32.



Слика 32 Коначни модели једностраног и двостраног конзолног регала

5. Поступак генерисања документације

Приликом израде решења, поред 3Д модела, битно је приказати и техничку документацију траженог регала, популарно цртеже. Приликом израде цртежа потребно је искотирати све неопходне димензије регала као што су: укупно осно растојање регала, осно растојање између стубова, висина стубова, дужина конзола и база, висине између суседних нивоа, дужине хоризонталних и дијагоналних укрућења. Поред ових основних елемената и њихових димензија, на цртежу је потребно појединачно издвојити и искотирати елементе који се не могу сасвим добро видети на главним пројекцијама, а то су: стопа (плоча) стуба и базе, везни лим (плоча) за везу базе и стуба, чеона плоча конзоле и плоча за ојачање стуба. Ове елементе није неопходно приказати приликом израде решења, међутим приликом саме израде конзолног регала они морају бити приказани на цртежу.

За аутоматско генерисање цртежа потребно је кликнути на дугме „*Dokumentacija*“ у упитнику програма.

Како би аутоматско генерисање документације функционисало, пре овога је, као и код генерисања модела, неопходно дефинисати адресу са које ће документација бити отворена. Дефинисање се такође врши исписивањем *кода* у VBA који је приказан на слици 33. Уколико се деси да последња конзола прелази висину стуба, након клика на дугме „*Dokumentacija*“, кориснику ће изаћи порука: „*Последња конзола прелази висину стуба! Пробати са другом конфигурацијом!*“, и тада није могуће отворити документацију.

```
Sub Button7_Click()
If Range("Parametri!C8") < 270 Then
n = Range("Parametri!C13").Value - (Range("Parametri!C8").Value - 100) / 2 - Range("Parametri!C94").Value - Range("Parametri!C95").Value - (Range("Upitnik2!B14").Value - 2) * Range("Parametri!C77").Value - 130
ElseIf Range("Parametri!C8") >= 270 And Range("Parametri!C8") < 360 Then
n = Range("Parametri!C13").Value - (Range("Parametri!C8").Value - 200) / 2 - Range("Parametri!C94").Value - Range("Parametri!C95").Value - (Range("Upitnik2!B14").Value - 2) * Range("Parametri!C77").Value - 130
Else
n = Range("Parametri!C13").Value - (Range("Parametri!C8").Value - 300) / 2 - Range("Parametri!C94").Value - Range("Parametri!C95").Value - (Range("Upitnik2!B14").Value - 2) * Range("Parametri!C77").Value - 130
End If
If n < 0 Then
MsgBox "Poslednja konzola prelazi visinu stuba! Probati sa drugom konfiguracijom!"
Else
If Sheet15.OptionButton1.Value = True Then
CreateObject("Shell.Application").Open ("D:\IC\Konzolni regal\Konzolni regal Dokumentacija.idw")
Else
CreateObject("Shell.Application").Open ("D:\IC\Konzolni regal\Dvostrani regal Dokumentacija.idw")
End If
End If
End Sub
```

Слика 33 Код за аутоматско генерисање документације регала

У прилогу А је дат пример генерисане документације конзолног регала са наведеним основним димензијама.

У прилогу је дата табела са набројаним основним елементима и димензијама приложене концепције, а на цртежу су приказане три основне пројекције конзолног регала са свим потребним димензијама, као и сви горе поменути елементи регала који се не могу видети на основним пројекцијама. Да би документација била комплетна, неопходно је да цртеж има и саставницу, која подразумева побројане све елементе регала, њихову позицију, број комада у склопу, димензије, материјал, масу и стандард или број цртежа.

Поред овога, детаљну спецификацију сваког елемента даје и описана методологија након прорачуна. То подразумева да је за сваки елемент појединачно дат тип тог елемента (нпр. ако је у питању конзола или стуб, дат је изабрани профил), димензија, јединична маса која подразумева масу елемента по метру (неопходно само за стуб, конзолу и базу), јединична маса која подразумева масу елемента по комаду, број елемената у склопу за једнострани и двострани регал, и укупна маса за једнострани и двострани регал. На слици 34 је дата спецификација једностраног и двостраног конзолног регала који има 4 стуба *IPE* 240 висине 4500 mm и 4 нивоа конзола *IPN* 100 дужине 1000 mm.

Поред набројаног, потребно је знати и укупну површину склопа коју треба заштитити на адекватан начин. На слици 35 је дата спецификација подсклопова регала чије површине треба заштитити. Концепција једностраног и двостраног регала је иста као за слику 34. Да би добили укупну површину и овде је потребно да знамо тип елемента, димензије, број елемената за једнострани и двострани регал, као и површину сваког елемента.

МАСАКОЛИЧИНА									
Позиција	Тип	Димензија (mm)	Јединична запремина (m ³ /kom)	Јединична маса (kg/m)	Јединична маса (kg/kom)	Комада за једностран	Комада за двостран	Укупна маса за једностран (kg)	Укупна маса за двостран (kg)
Стуб	ГРЕ240	4500	/	30,7	138,15	4	4	552,60	552,60
Укрупњење стуба	/	10	0,00009	/	0,7065	8	8	5,65	5,65
База	ГРЕ240	1000	/	30,7	30,7	4	8	122,80	245,60
Уводник базе	/	240	0,00003	/	2,355	4	8	9,42	18,84
Конзола	ГРН100	1000	/	8,3	8,3	16	32	132,80	265,60
Уводник конзоле	/	100	0,00003	/	0,2355	16	32	3,77	7,54
Чвона плоча	/	220x120x20	0,000528	/	4,1448	16	32	66,32	132,63
Предња плоча базе	/	340x100x10	0,00034	/	2,609	4	8	10,68	21,35
Плоча стуба	/	340x340x10	0,001156	/	9,0746	4	4	36,30	36,30
Плоча за везу базе и стуба	/	10	0,00009	/	0,7065	8	16	5,65	11,30
Плоча укрупњења	/	100x107x5	0,0000335	/	0,4199	18	18	7,56	7,56
Хоризонтално укрупњење	U	1380	0,0003891	/	3,05490	9	9	27,49	27,49
Дијагонално укрупњење	U	2055	0,0005794	/	4,54853	6	6	27,29	27,29
Граничник	/	300	0,0000411	/	0,3226	20	40	6,45	12,91
Завртањ укрупњења	M12	30	/	/	0,052	18	18	0,94	0,94
Завртањ за конзоле и базе	M12	60	/	/	0,079	80	160	6,32	12,64
Подношка за укрупњења	M12	12	/	/	0,006	18	18	0,11	0,11
Подношка за конзоле и базе	M12	12	/	/	0,006	80	160	0,48	0,96
Опругаста подношка укрупњења	M12	12	/	/	0,006	18	18	0,11	0,11
Опругаста подношка конзоле и базе	M12	12	/	/	0,006	80	160	0,48	0,96
Навртка укрупњења	M12	12	/	/	0,026	18	18	0,47	0,47
Навртка конзоле и базе	M12	12	/	/	0,026	80	160	2,08	4,16
Подношка граничника	M20	20	/	/	0,016	20	40	0,32	0,64
Анкер	M16	16	/	/	0,295	16	24	4,72	7,08
						Укупно (kg) без завртањске робе:		1014,78	1372,67
						Укупно (kg):		1030,80	1400,73

Слика 34 Спецификација конзолног регала – укупна маса регала

ПОВРШИНА ЗА ЗАШТИТУ							
Позиција	Тип	Димензија (mm)	Јединична површина (m ²)	Комада за једнострани	Комада за двострани	Укупна површина за једнострани (m ²)	Укупна површина за двострани (m ²)
Стуб са стопом	IPE240	4500	4,69	4	4	18,76	18,76
База са стопом и уводником	IPE240	1000	1,17	4	8	4,68	9,36
Конзола са чеоном плочом и уводником	IPN100	1000	0,48	16	32	7,68	15,36
Хоризонтала U НОР	U	1380	0,27	9	9	2,43	2,43
Дијагонала U НОР	U	2055	0,4	6	6	2,40	2,40
Граничник (цинковање)	/	300	0,03	20	40	0,60	1,20
					Укупно без граничника (m ²):	35,95	48,31

Слика 35 Спецификација конзолног регала – укупна површина регала

5. Провера конзолног регала методом коначних елемената

Како би били сигурни да ће изабрана конфигурација конзолног регала носити предвиђени терет, потребно је регал проверити на више начина. Поред искуственог знања и аналитичког прорачуна који је извршен, свака конфигурација регала је анализирана и методом коначних елемената (МКЕ).

МКЕ представља нумеричку методу структурне анализе која се користи за добијање апроксимативних решења за широк спектар инжењерских проблема. МКЕ може да подржи било који сложени облик конструкције, било која материјална својства као и различите облике оптерећења. У циљу примене МКЕ неопходно је добро познавање проблема који се анализира. Поступак статичке анализе применом методе коначних елемената подразумева следеће кораке:

- Дефинисање материјала модела
- Дефинисање ограничења
- Задавање оптерећења
- Дефинисање контаката између појединих елемената модела
- Дефинисање мреже коначних елемената
- Анализа
- Очитавање резултата

Пошто је модел конзолног регала израђен у софтверском пакету *Autodesk Inventor*, у овом програму је извршена и анализа методом коначних елемената. Због бржег и једноставнијег прорачуна, анализа није извршена на целом моделу већ је издвојен један стуб са конзолама, базом и завртањским везама оствареним између њих.

Извршена је анализа и провера конзолног регала са карактеристикама приказаним на слици 36:

1. Tip konzolnog regala	
☒ Jednostrani	☐ Dvostrani
2. Stub	
Visina stuba H (mm)	4500
Broj stubova N	4
Oсно растојanje A (mm)	1500
3. Baza	
Dužina baze B (mm)	1000
4. Konzola	
Dužina konzole K (mm)	1000
Šupljina prvog nivoa P1 (mm)	812
Šupljina drugog nivoa P2 (mm)	712
Šupljina ostalih nivoa P3 (mm)	712
Broj konzola po stubu M	4
5. Opterećenje	
Težina bunta Q (kg)	4000
Opterećenje po konzoli Q1 (kg)	1000
Opterećenje po stubu (kg)	4000
6. Blok	
Broj blokova	1
Rastojanje između blokova (mm)	2000

Microsoft Excel

Konzola IPN 100 zadovoljava!

OK

Microsoft Excel

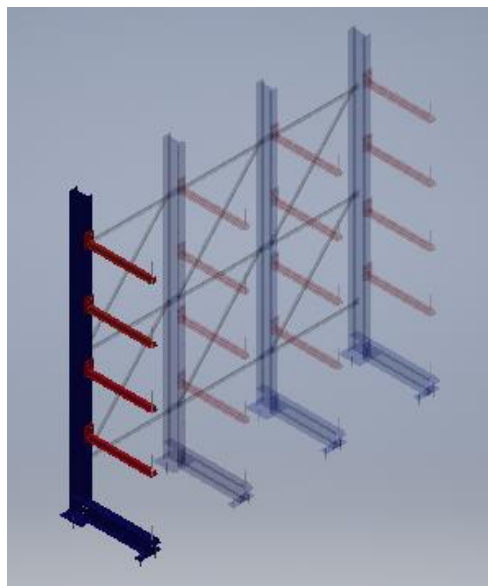
Stub IPE 240 zadovoljava!

OK

Слика 36 Карактеристике анализираног конзолног регала

Анализирани регал је једнострани регал са 4 стуба и 4 конзоле по стубу, као на слици 32. Прорачунати профил стуба је *IPE 240*, а конзоле *IPN 100*. Веза између конзоле и стуба је остварена са 4 завртња.

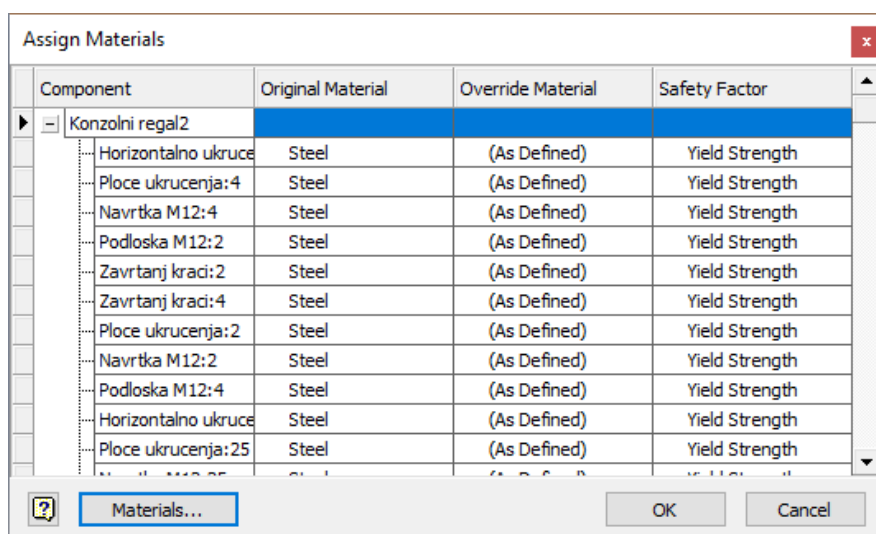
Да би започели статичку анализу, потребно је у *Inventor*-у одабрати картицу *Environments*, а затим модул *Stress Analysis*. Када је ово одрађено, из анализе треба искључити непотребне елементе, односно оставити само један стуб са четири конзоле и базом, слика 37.



Слика 37 Анализирани регал са искљученим елементима

5.1 Дефинисање материјала модела

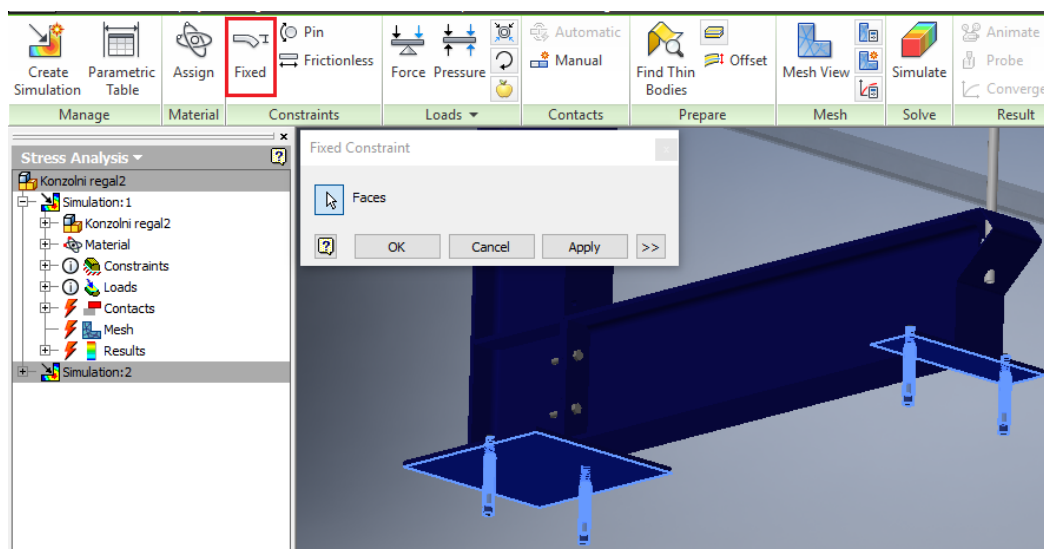
Након дефинисања геометрије регала која се анализира, потребно је задати материјал. Дуплим кликом на *Material* у стаблу са леве стране отвара се прозор у коме је потребно сваком елементу регала задати материјал, слика 38. За израду конзолних регала се најчешће користе конструкциони челици *S235* или *S275* па се сваком елементу као материјал задаје челик (*steel*) са својим карактеристикама, табела 8.



Слика 38 Задавање материјала

5.2 Дефинисање ограничења

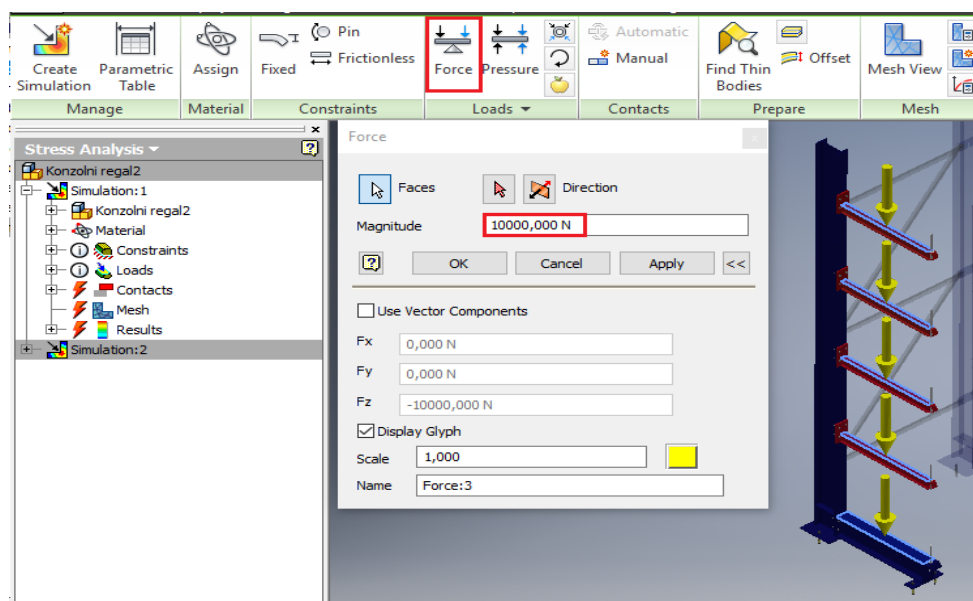
Да би резултати анализе били тачни и приближни реалном стању, потребно је и ограничења поставити тако да најприближније представљају стварне услове. Пошто је регал најчешће анкерима причвршћен за бетонску подлогу преко плоча које се налазе на бази и стубу, потребно је фиксирати и анкере и доње површине плоча, слика 39.



Слика 39 Задавање ограничења

5.3 Задавање оптерећења

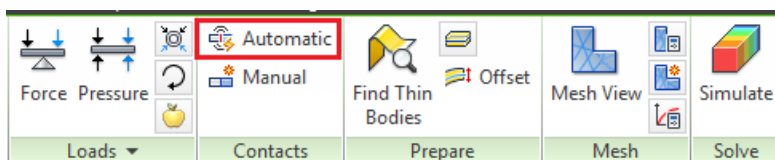
Како се терет који оптерећује регал налази на конзолама и базама, потребно је конзоле и базе на средини оптеретити подједнаком силом. Пошто је целокупно оптерећење једног нивоа 4000 kg, оптерећење по једној конзоли биће 1000 kg па се у програму задаје сила од 10000 N, слика 40.



Слика 40 Задавање оптерећења

5.4 Дефинисање контаката

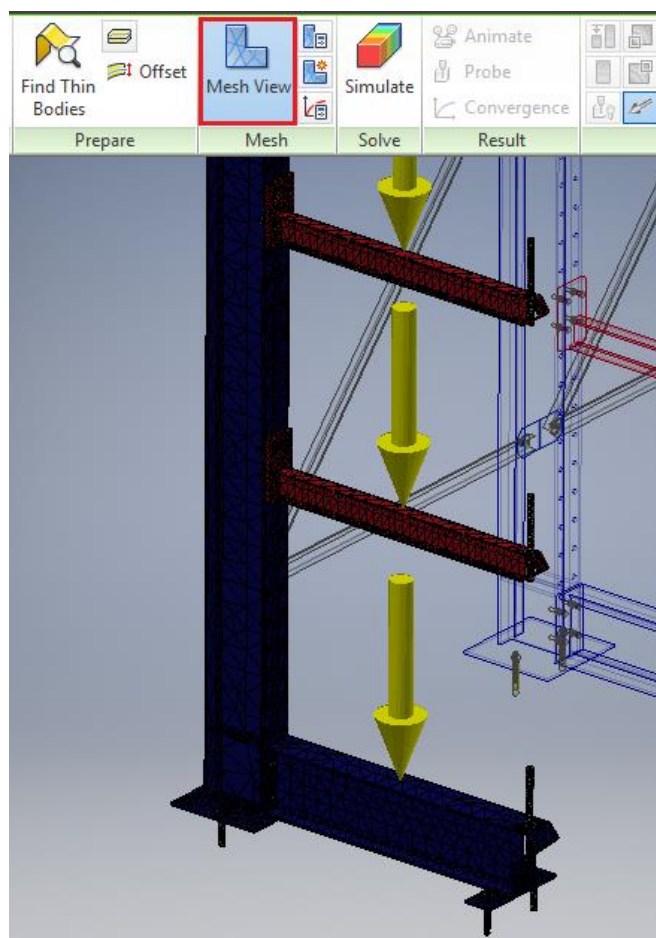
Након постављања ограничења и оптерећења потребно је дефинисати контакте између елемената регала. Постоје две могућности дефинисања контаката: мануелно и аутоматски. Мануелно дефинисање подразумева да се контакт између свака два елемента појединачно дефинише, док аутоматско постављање контакта подразумева да програм сам препознаје контакте између свих елемената и дефинише их. У овом случају, пошто постоји много елемената у међусобном контакту, изабрано је аутоматско дефинисање, слика 41.



Слика 41 – Аутоматско дефинисање контаката

5.5 Дефинисање мреже коначних елемената

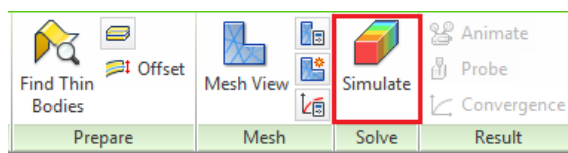
Следећи корак представља генерисање мреже коначних елемената, слика 42. У зависности од величине елемента регала, програм аутоматски одређује величину 3Д коначног елемента. На пример, коначни елементи код отвора за завртњеве су знатно мањи него елементи стуба. Анализирана конфигурација регала се састоји од 208335 чворова и 104057 3Д коначних елемената.



Слика 42 Постављање мреже коначних елемената

5.6 Покретање анализе

Када су сви кораци извршени, може се покренути анализа, избором опције *Simulate*, у *toolbar*-у *Stress Analysis* слика 43.

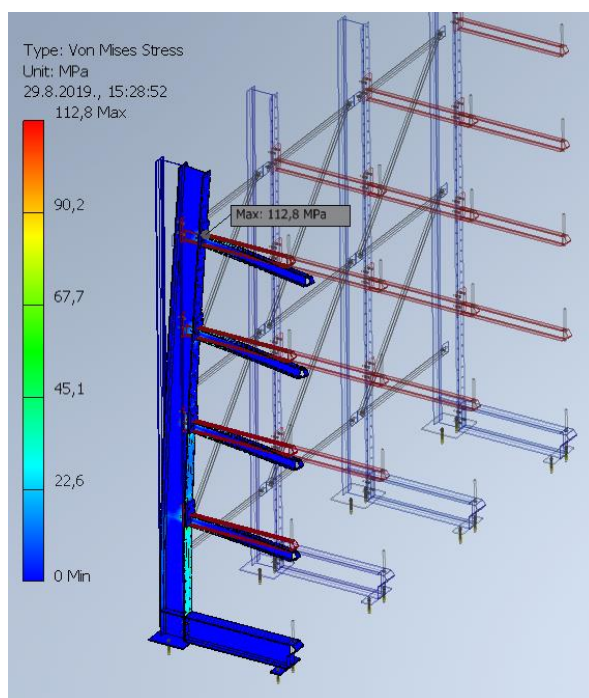


Слика 43 Покретање анализе

5.7 Анализа резултата

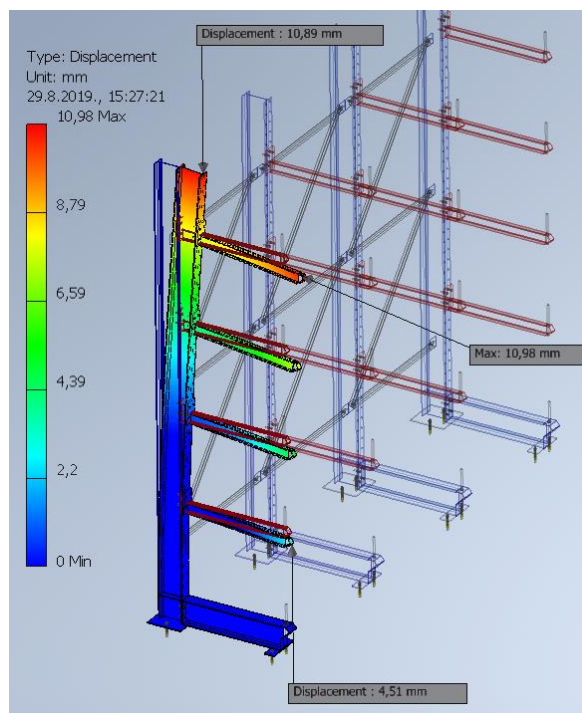
Када је анализа завршена, потребно је „прочитати“ резултате. Могуће је прочитати податке о напону, померањима, контактном притиску између елемената, степену сигурности и друге. У овом случају најбитније је проверити да ли конзолни регал задовољава граничне услове у погледу напона и померања, односно угиба конзоле и стуба.

На слици 44 је приказан максимални напон који се јавља код конзолног регала и он износи 112,8 МПа, а јавља се у делу стуба изнад последње козоле. Уколико се има у виду да је допуштени напон са усвојеним одговарајућим степеном сигурности за изабрани материјал (челик S235) 156 МПа [5], може се закључити да ова конфигурација није критична у погледу напона.



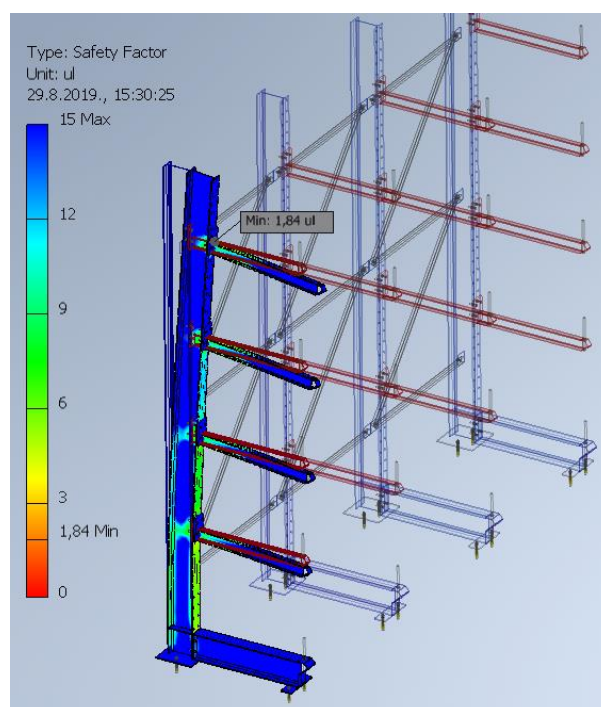
Слика 44 Максимални напон конзолног регала

На слици 45 је приказано максимално померање регала, као и померања стуба и конзоле. Померање врха стуба регала је 10,89 mm, конзоле 4,51 mm, док је резултујуће померање регала 10,98 mm. Пошто се дозвољене деформације стуба и конзоле рачунају као $l/200$ [2], а имајући у виду оптерећење, висину стуба и дужину конзоле, закључује се да ни у овом погледу није дошло до прекорачења граничних услова.



Слика 45 Померања елемената конзолног регала

Битан податак који треба проверити је степен сигурности, слика 46. Очитан је минимални степен сигурности анализираниог регала и он износи 1,84, а јавља се на стубу, на месту максималног напона. Како степен сигурности код елемената оптерећених на извијање не би требало да буде мањи од 1,5 до 5 [11], може се рећи да степен сигурности задовољава.



Слика 46 Степен сигурности за анализирану конфигурацију регала

На крају се закључује да анализирана конфигурација конзолног регала испуњава све граничне услове и да се регал може пустити у производњу.

6. Закључак

Након разматрања основних карактеристика, начина функционисања и примене конзолних регала, у оквиру овог рада је развијена методологија базирана на најсавременијим концептима моделирања и прорачуна носећих елемената регалне конструкције.

Развијена методологија омогућава аутоматско генерисање тродимензионалног модела конструкције конзолног регала као и комплетне пројектне документације, коришћењем спреге CAD програмског пакета *Autodesk Inventor* и *Microsoft Excel* програма за табеларне прорачуне. Тродимензионални модел конзолног регала генерисан у програмском пакету *Autodesk Inventor*, одређен је низом параметара који дефинишу како димензије, тако и међусобне односе појединих елемената 3Д модела. Геометријски параметри модела, елемената регалне конструкције, израчунавају се на основу скупа захтеваних улазних података дефинисаних у пројектном задатку у *Microsoft Excel*-у. Пошто је конзолни регал челична конструкција, прорачун је вршен према Еврокоду 3, али и према пропису FEM 10.2.09, који се односи на пројектовање конзолних регала.

Основна намена поступка аутоматског прорачуна конструкције и параметарског формирања тродимензионалног модела регала је брзо и поуздано налажење оптималног решења на основу унетих жељених параметара у пројектном задатку, односно упитнику.

Применом ове методологије постиже се оптимизација конструкције, али и одржавање сигурности, као и могућност израде решења у што краћем временском року. Ово обезбеђује знатну уштеду материјала потребног за израду регала, као и времена за израду решења. Овакав приступ складишној техници у погледу пројектовања неопходан је у циљу очувања квалитета, поузданости и конкуретности третираног производа.

Након одабира оптималног решења, израде модела и документације регала, дата је и детаљна спецификација добијене концепције, што подразумева приказ димензија и броја свих елемената регала, њихову појединачну масу, укупну масу регала, као и површину коју треба адекватно заштитити одговарајућим средствима.

Ради потврде избора праве концепције конзолног регала, корисник има и могућност провере исте, методом коначних елемената. Могуће је очитати податке о напону, померањима, контактном притиску између елемената, степену сигурности и друге. У овом раду је извршена провера једне концепције регала у оквиру *Autodesk Inventor*-а, у модулу предвиђеном за статичку анализу и описан је поступак вршења анализе.

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 плана распореда регала, као и методе коначних елемената за прорачун елемената конструкције регалног складишта долази до резултата, који могу имати велику примену у свакодневној инжењерској пракси у области пројектовања и извођења конструкција регалних складишта.

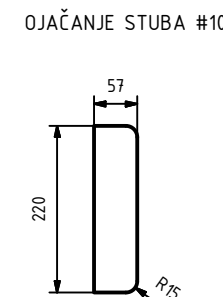
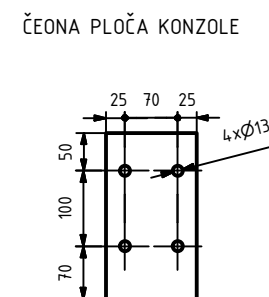
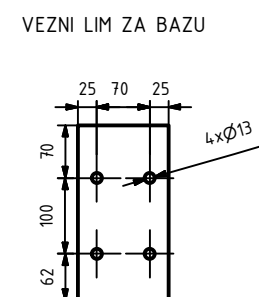
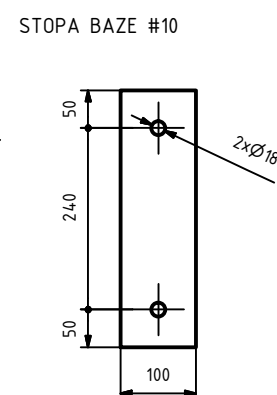
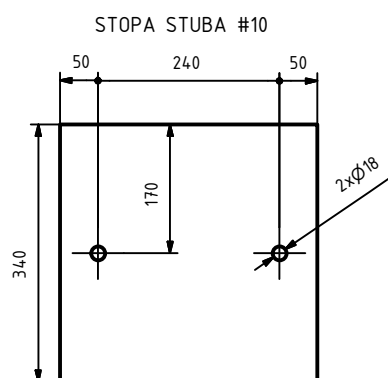
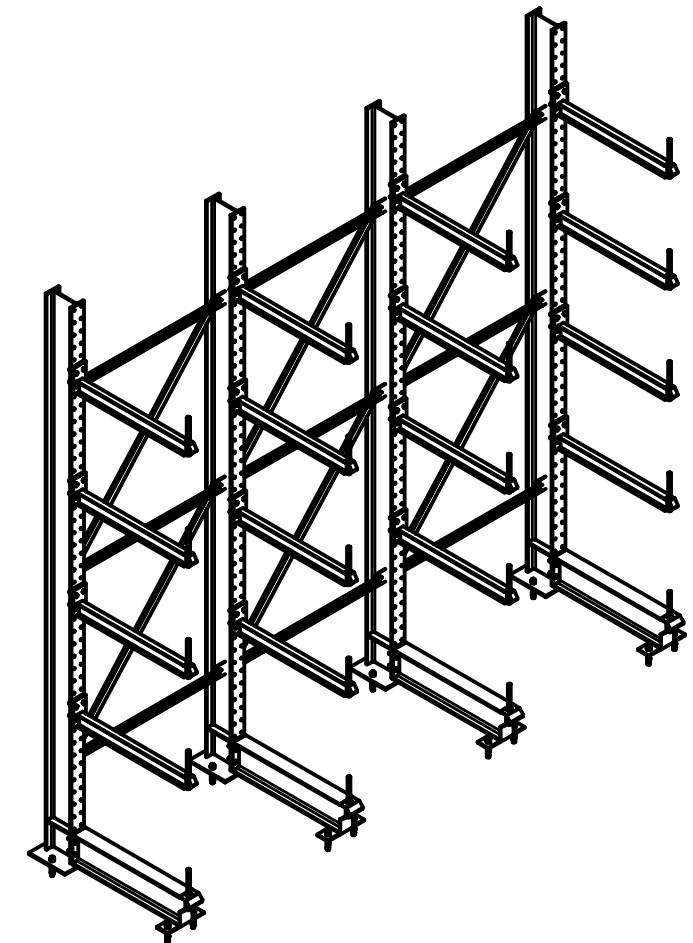
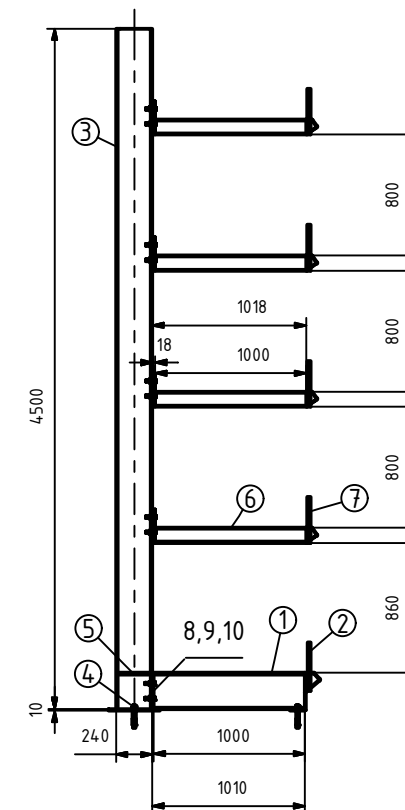
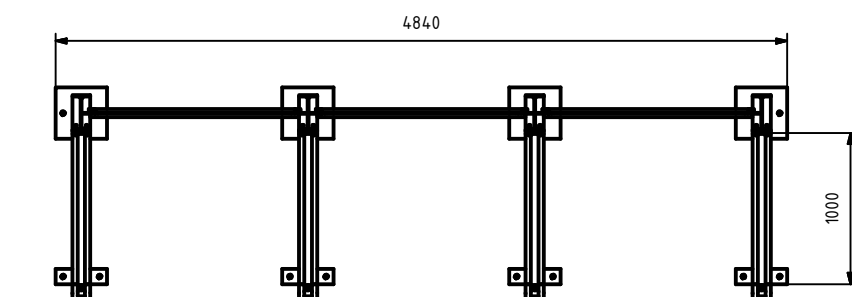
ПРИЛОГ А: ГЕНЕРИСАЊЕ ДОКУМЕНТАЦИЈЕ

Табела 18 Пројектни заатак

Тип конзолног регала	Једнострани
Стуб	
Висина стуба H (mm)	4500
Број стубова n	4
Осно растојање стубова A (mm)	1500
Профил стуба	IPE 240
База	
Дужина базе B (mm)	1000
Профил базе	IPE 240
Конзола	
Дужина конзоле K (mm)	1000
Број конзола по стубу m	4
Профил конзоле	IPN 100
Оптерећење	
Тежина бунта Q (kg)	4000
Оптерећење по конзоли Q_1 (kg)	1000
Оптерећење по стубу Q_2 (kg)	4000
Блок	
Број блокова	1

Табела 19 Графичка документација

Ред. бр.	Назив цртежа	Име фајла	Број цртежа
1.	Склоп конзолног регала	<i>Konzolni regal Dokumentacija.pdf</i>	01.00.00.00



15	Podloska M12	18	M12		0,006	SRPS M.B2.11
14	Navrtka M12	18	M12	8	0,010	SRPS M.B1.601
13	Vijak kraci M12 x 30	18	M12 x 30	8.8	0,043	SRPS M.B1.053
12	Dijagonalno ukrucenje U HOP 50x25x3	6	2055	S 235	4,585	
11	Horizontalno ukrucenje U HOP 50x25x3	9	1380	S 235	3,113	
10	Podloska M12	80	M12		0,006	SRPS M.B2.11
9	Navrtka M12	80	M12	10	0,010	SRPS M.B1.601
8	Vijak duzi M12 x 50	80	M12 x 50	10.9	0,061	SRPS M.B1.053
7	Granicnik konzole	16	303	S 235	0,321	
6	Konzola sa čeonom pločom	16	1000	S 235	6,045	
5	Ojačanje stuba	8	220x57	S 235	0,439	
4	Čelični anker M16 x 110	16	M16 x 110	8.8	0,23	
3	Stub sa stopom	4	4500	S 235	46,580	
2	Granicnik baze	4	303	S 235	0,331	
1	Baza sa stopom	4	1000	S 235	20,679	

POZ.	NAZIV	KOM.	DIMENZIJA (mm)	MATERIJAL	MASA	STANDARD/BR. CRT
			INVESTITOR – KORISNIK			
	Ime i prezime	Potpis	OBJEKAT Hala			
ODG. PROJ.						
CRTAO	Pavle Živković		PROJEKAT KONZOLNI REGAL			
KONTROL.						
OVERA						
MERILO 1 : 50	NAZIV Sklop konzolnog regala				DATUM 11.3.2019.	BROJ CRTEŽA 01.00.00.00 ZAMENA ZA CRTEŽ

Литература

- [1] SRPS EN 1993-1-8:2012 *Спојеви са вијцима високе класе чврстоће код носећих челичних конструкција – Технички услови*
- [2] FEM 10.2.09: *CODE OF PRACTICE, The Design Of Cantilever Racking*, European Racking Federation, June 2015.
- [3] Софтверски пакет *Microsoft Office Excel 2016*
- [4] Б. Зарић, Д. Буђевац, Д. Стипанић, *Челичне конструкције у грађевинарству*, ИРО Грађевинска књига, Београд, 1995.
- [5] Д. Буђевац, З. Марковић, Д. Богавац, Д. Тошић, *Металне констрикције – основе прорачуна и конструисања*, Грађевински факултет Универзитета у Београду, Београд, 1997.
- [6] Данило Рашковић, *Таблице из Отпорности материјала*, Грађевинска књига, Београд 1987.
- [7] Еврокод 3 – *Прорачун челичних конструкција Део: 1-3*, Грађевински факултет у Београду, Београд, 2009.
- [8] SSI SCHAEFER, Giebelstadt, Germany, *Cantilever racking systems*
- [9] Еврокод 3 - *Прорачун челичних конструкција Део: 1-8, Прорачун веза*, Грађевински факултет у Београду, Београд, 2005.
- [10] Софтверски пакет *Autodesk Inventor Professional 2016*
- [11] М. Ћировић, *Отпорност материјала*, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2008.