

**Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу**



**Назив студијског програма: Машинско инжењерство**

**Ниво студија: Мастер академске студије**

**Модул: Машинске конструкције и механизација**

**Предмет: Заварене и ливене конструкције**

**Број индекса: 317/2014**

**Ненад Р. Николић**

## **Заварени решеткасти површински носачи**

**Мастер рад**

**Комисија за преглед и одбрану:**

**1. Др Иван Милетић - ментор**

2. \_\_\_\_\_

3. \_\_\_\_\_

Датум одбране: \_\_\_\_\_

Оцена: \_\_\_\_\_

У оквиру овог мастер рада кандидат треба да:

- Пројектовање и аналитички прорачун раванске решеткисте конструкције;
- Креира 3D модел и техничку документацију пројектованог алата у једном од популарних 3D CAD softvera по његовом избору.

Препоручена литература:

- [1] *Еврокод ЕС 1991-1-3:2003*, Грађевински факултет Универзитет у Београду, Новембар 2009
- [2] *Еврокод ЕС 1991-1-4:2005*, Грађевински факултет Универзитет у Београду, Новембар 2009.
- [3] *Еврокод ЕС 1993-1-1:2005*, Грађевински факултет Универзитета у Београду, Фебруар 2006.
- [4] *Еврокод ЕС 1993-1-8:2005*, Грађевински факултет Универзитет у Београду, Фебруар 2006.

Крагујевац, март 2018.

ментор:

Др Иван Милетић, доцент

---

## **РЕЗИМЕ**

---

У оквиру овог рада извршено је пројектовање раванске решеткасте конструкције. Аналитичким прорачуном и коришћењем Еврокодова извршено је одређивање оптерећења, димензионисање носећих профила и заварених спојева. По извршеном аналитичком прорачуну, креиран је 3D модел и склопни цртеж пројектоване решеткасте конструкције у софтверском пакету *SolidWorks*. У финалном делу овог рада пројектована конструкција анализирана је и са других аспеката, као што су одржавање и цена израде.

**Кључне речи:** *решеткаста конструкција, Еврокодови, SolidWorks, заварени спојеви*

## **ABSTRACT**

---

Within the scope of this paper, plane truss construction was designed. Using analytical calculation methods and Eurocodes, loads, structural members and welded joint were determined. Upon finished analytical dimensioning, 3D model and assembly drawing of the designed truss construction in software package *SolidWorks*. In the final part of this paper designed construction was analysed from other aspects, like maintenance and cost.

**Keywords:** *truss construction, Eurocodes, SolidWorks, welded joint*

## Садржај

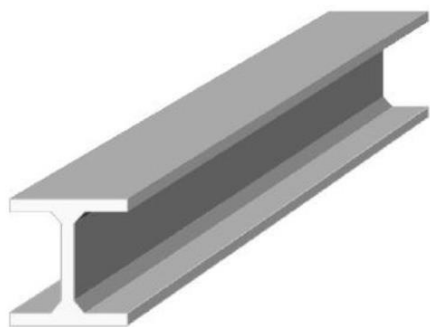
|                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Увод.....                                                                          | 3  |
| 2. Решеткасте конструкције .....                                                      | 5  |
| 2.1. Раванске решетке .....                                                           | 6  |
| 2.2. Просторне решетке.....                                                           | 7  |
| 2.3. Статички одређени носачи .....                                                   | 10 |
| 2.4. Статички неодређени носачи .....                                                 | 10 |
| 2.5. Начин спајања решетки.....                                                       | 11 |
| 2.5.1.    Закивци .....                                                               | 12 |
| 2.5.2.    Завртњеви.....                                                              | 13 |
| 2.5.3.    Заваривање .....                                                            | 18 |
| 3. Аналитичко решавање сила у решетки .....                                           | 23 |
| 3.1. Метода чворова .....                                                             | 23 |
| 3.2. Ритерова метода .....                                                            | 24 |
| 4. Одређивање носивости заварених спојева по ЕУРОКОД-у.....                           | 25 |
| 4.1. Прорачунска носивост угаоних шавова .....                                        | 25 |
| 4.1.1.    Дужина шавова .....                                                         | 25 |
| 4.1.2.    Ефективна дебљина угаоних шавова .....                                      | 25 |
| 4.2. Прорачунска носивост сучеоних шавова .....                                       | 25 |
| 4.2.1.    Шавови са пуним проваром.....                                               | 25 |
| 4.2.2.    Сучеои шавови са делимичним проваром.....                                   | 26 |
| 4.2.3.    Сучеои Т спојеви .....                                                      | 26 |
| 5. Пример.....                                                                        | 27 |
| О конструкцији из примера .....                                                       | 27 |
| 5.1. Одређивање дејстава .....                                                        | 28 |
| 5.1.1.    Одређивање дејства снега, цеви, воде у цеви и решеткасте конструкције ..... | 29 |
| 5.1.2.    Одређивање притиска ветра .....                                             | 31 |
| 5.2. Прорачун хоризонталног дела решетки .....                                        | 33 |
| 5.2.1.    Одређивање отпора ослонаца .....                                            | 33 |
| 5.2.2.    Одређивање сила у штаповима решетки .....                                   | 34 |
| 5.2.3.    Димензионисање штапова .....                                                | 41 |
| 5.2.4.    Одређивање угиба решетки.....                                               | 45 |
| 5.3. Анализа осталих параметара конструкције .....                                    | 50 |
| 5.3.1.    Одређивање силе ветра .....                                                 | 50 |
| 5.3.2.    Прорачун штапова који спајају раванске решетке.....                         | 56 |
| 5.3.3.    Прорачунавање заварених спојева.....                                        | 57 |
| 5.4. Прорачунавање ужета .....                                                        | 68 |
| 6. Креиран 3Д модел .....                                                             | 69 |
| 7. Остали параметри и напомене за конструкцију .....                                  | 73 |

|                    |    |
|--------------------|----|
| 8. Закључак .....  | 74 |
| 9. Литература..... | 75 |
| 10. Додатак .....  | 76 |

## 1. Увод

Највећа револуција у савременом инжењерству настала је применом челика. Основни разлог за широку примену представља однос техничких својстава и специфичне масе, али и изузетено ниске цене и широке доступности на тржишту. Данас се практично не може замислити модерна конструкција без примене челика.

У грађевини карактеристична је примена челика са неким другим материјалима (нпр. бетоном), док је за машинског инжењера знатно интересантнија анализа челичних конструкција без додатних материјала. У пракси, најчешће се сусрећемо са најједноставнијим носачима – гредама (слика 1.1. а), али и сложеним решеткастим конструкцијама мостова (слика 1.2. б).



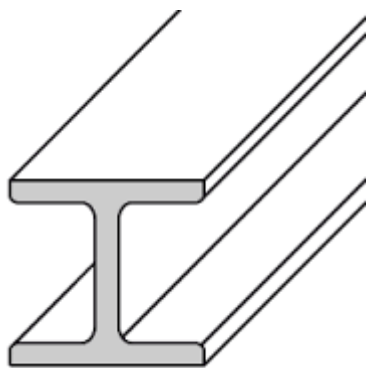
(а)



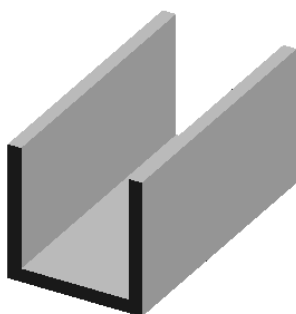
(б)

Слика 1.1. Примена решеткастих конструкција

Челик се најчешће примењује у виду стандардизованих профила, цеви итд. У индустрији најширу примену налазе I (слика 1.2. а), U (слика 1.2. б), L (слика 1.2. в), сандучасти профили (слика 1.3. а) и цеви (слика 1.3. б). Како би се остварила униформисаност челичних конструкција, олакшао процес пројектовања, али и омогућила боља тржишна понуда материјала, карактеристике ових профила стандардизоване су бројним стандардима (EN, AISI) у зависности од дела света у којем се пројектује/прави челична конструкција. У Европи се најчешће користе EN стандарди.



(а)



(б)



(в)

Слика 1.2. Стандардни профили



(г)



(д)

**Слика 1.3.** Сандуцаст и цеваст профил

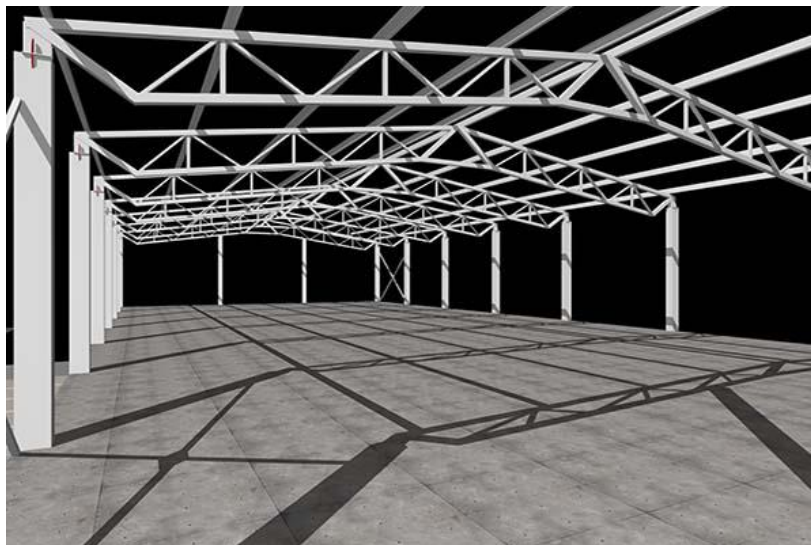
Због велике примене челичних конструкција у савременој индустрији, временом је дошло и до потребе за стандардизацијом прорачуна. У Европи, процес пројектовања челичних конструкција стандардизован је применом *Еврокодова*. [8] Применом ових стандардизованих прорачуна челична конструкција се може пројектовати у знатно краћем временском периоду уз остварење свих тражених техничких и безбедносних захтева. Потребно је напоменути и да су у *Еврокодовима* доступни бројни технички подаци који су добијени екстензивним експерименталним испитивањима. Овај податак је изузетно важан јер пројектант често нема приступ поузданим подацима који значајно утичу на прорачун конструкције, као што је нпр. дејство ветра на конструкцију.

Поред бројних техничких бенефита, стандардизацијом прорачуна, компаније које врше услуге пројектовања, применом *Еврокодова* имају бољу позицију на тржишту јер могу лакше доказати тачност свог прорачуна. Применом *Еврокодова* у процесу пројектовања постиже се оптимизована конструкција која није предимензионисана. Самим тим остварује се знатно мањи утрошак материјала, бољи визуелни ефекат, што самим тим доводи до знатно ниже цене, што за пројектантске фирме може значити и знатно бољу позицију на тржишту.

Поред анализе оптерећења на челичне конструкције, потребно је и анализирати друге изузетно важне карактеристике, као што су прорачун заварених спојева, начин одржавања конструкције и утицај спољашње средине, итд. Како и ови параметри значајно утичу на пројектантско решење, и они су стандардизовани *Еврокодовима*.

## 2. Решеткасте конструкције

Решеткасте конструкције због својих бројних бенефита налазе изузетно широку примену у индустрији. Састоје се од међусобно повезаних појасних штапова и штапова испуне који формирају једну решеткасту секцију приказану на слици 2.1.



Слика 2.1. Пример решеткасте конструкције

Основни предности решеткастих конструкција у односу на традиционалне пуне носаче су: [1]

- боље искоришћење материјала,
- мања тежина, а самим тим и мањи утрошак материјала,
- могућност премашавања великих распона и
- транспарентност (у специјалним случајевима).

Као највећи недостатак решеткастих конструкција наводи се знатно компликованији процес њиховог пројектовања и израде. Ово се првенствено огледа већем броју штапова које је потребно повезати у јединствену целину са осталим елементима.

У индустрији се користе раванске – 2D и просторне 3D решетке. У већини случајева реална решеткаста конструкција се може апроксимирати раванском у циљу лакшег и бржег прорачуна. Међутим, потребно је напоменути да се сложене просторне решеткасте конструкције нестандардних облика не могу апроксимирати раванским, већ се морају разматрати у својој реалној форми.

Решеткасте конструкције налазе изузетно широку примену у најразличитијим гранама индустрије, од зградарства, мостоградње па чак до дизаличних конструкција. У грађевинарству се најчешће користе за кровне носаче великих распона. У мостоградњи налази примену код најразличитијих типова мостова, од железничких и путничких мостова па све до мостова специјалних потреба. У сфери дизаличних конструкција, најчешће су торањ и стрела решеткасти носачи, и то код грађевинских (слика 2.2. а), и порталних дизалица (слика 2.2. б).



(a)



(б)

**Слика 2.2.** Дизаличне конструкције

За прорачун заварених спојева и дејстава која делују на решеткасту конструкцију могу користити *Еврокодови*. Међутим за анализу сила у штаповима, потребно је користити методе из области статике. Примењују се: графичке, аналитичке и нумеричке методе.

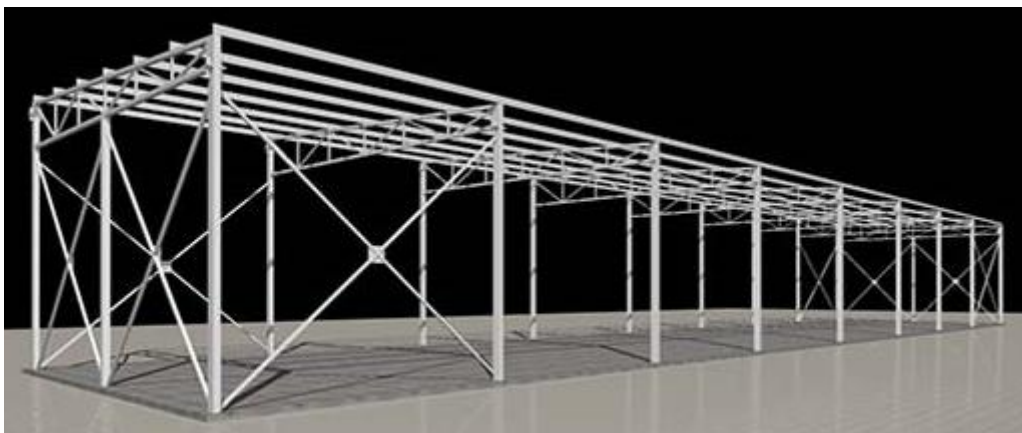
- Кремонаина метода (графички поступак).
- Издвајање чворова (аналитички поступак),
- Методе коначних елемената (МКЕ) и
- Методе коначних разлика (МКР)

међутим због знатно веће тачности у пракси се примењују аналитичке и нумеричке методе. Због великог броја штапова који могу чинити једну решеткасту конструкцију, аналитички поступак је временски захтева и изузетно компликован, па се данас у индустрији решеткасте конструкције најчешће пројектују коришћењем нумеричких софтвера, као што су *Siemens FEMAP* и *ABAQUS*.

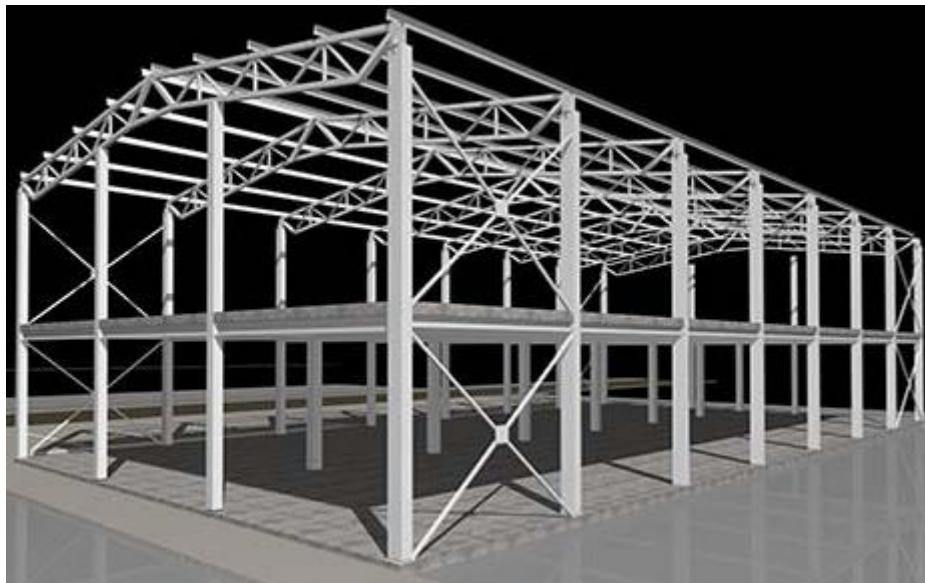
## 2.1. Раванске решетке

Раванска решетка је равански носач, сачињен од међусобно повезаних штапова, који представљају круту везу. [1] Штапови су повезани међусобно својим крајњим тачкама. У идеализацији која је усвојена, штапови решетке се сматрају лаким штаповима, а њихове међусобне везе су зглобови. Зглобови који повезују најмање два штапа решетке називају се чворовима.

Неки примери решеткастих конструкција приказани су на сликама 2.3, 2.4, 2.5. На слици 2.3. приказана је једноводна решеткаста конструкција.

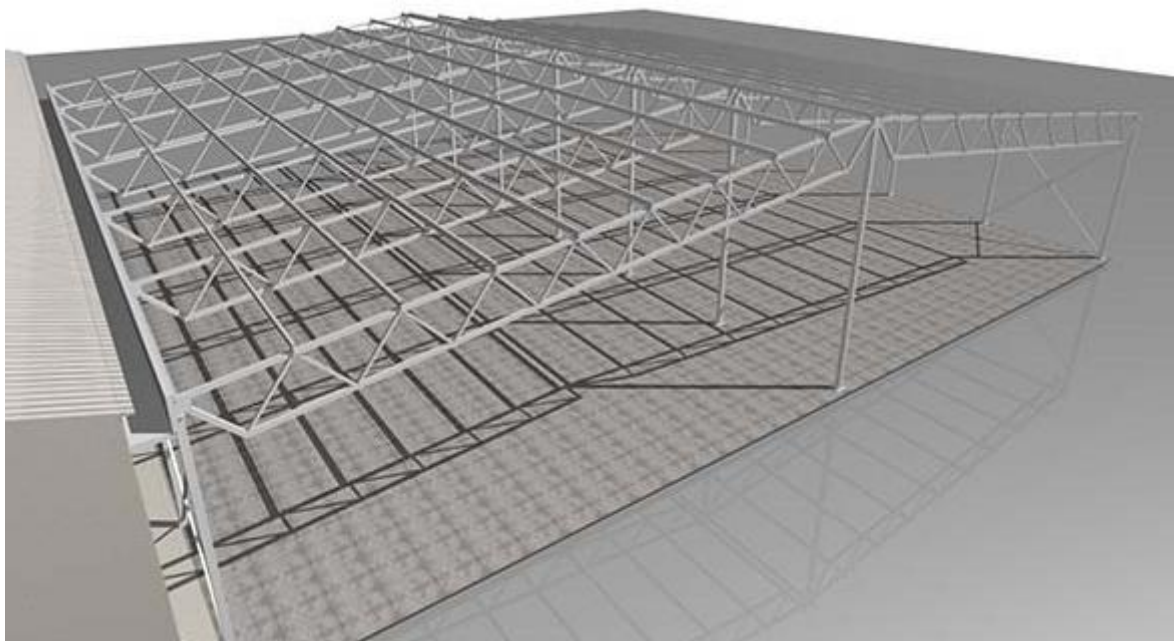
**Слика 2.3.** Једноводна решеткаста конструкција

На слици 2.4. може се видети двоводна решеткаста конструкција.



**Слика 2.4.** Спратна решеткаста конструкција

На слици 2.5. приказује се решеткаста кровна конструкција са средњим ослонцем.



**Слика 2.5.** Решеткаста конструкција са средњим ослонцем

## 2.2. Просторне решетке

Просторни решеткасти носачи имају малу властиту тежину те се сврставају у лаке металне конструкције. Као што су равнински решеткасти носачи замена пуних линијских носача, просторни решеткасти носачи представљају замена масивних површинских носача.

Идеја о просторним решеткастим носачима преузета је из природе, ондосно биљног и животињског свијета. Паукова мрежа и пчелиње саће су примјери просторних конструкција које садрже све елементе модерне конструкције: сигурност, једноставност, брзу градњу и малу тежину.

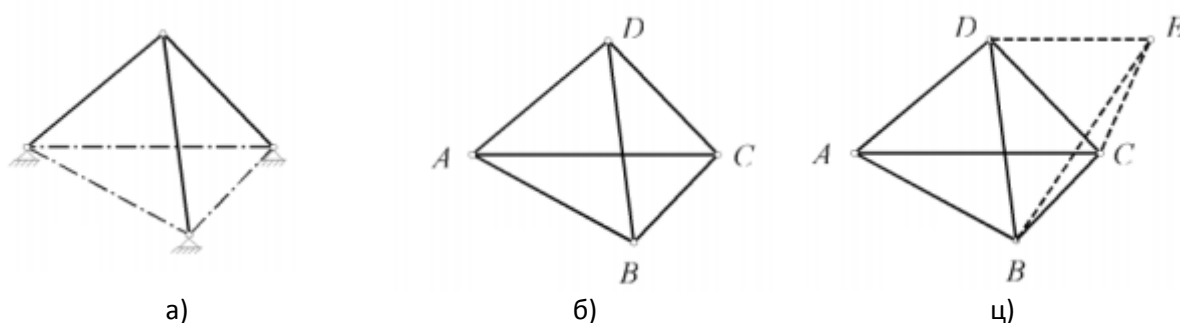
Прве теоријске основе за формирање просторних решеткастих носача поставио је Аугуст, 1892. године: [1]

1) Најмање геометријско тело, које се може користити као основни елемент за формирање просторне решетке, формира се од четири троугаоне површине, повезаних са четири чвора и шест штапова

2) Сваки основни елемент са четири површине је статички стабилан

3) Најбоље је формирање просторних решетки од четвороповршинских елемената

Најједноставнија просторна решетка је тространа пирамида (слика 2.6.а). Ако пирамиду одвојимо од његове круте подлоге, стабилност се може задржати ако се додају три нова штапа која спајају чворове у ослонцима. На тај начин добије се круто геометријско тело, односно тетраедар (слика 2.6.б). Тетраедар се може проширити додавањем три нова штапа која се спајају у новом чвору (слика 2.6.ц) те се на тај начин може обликовати просторна решеткаста структура, чији је основни елемент тетраедар.



Слика 2.6. Основни модули просторних решеткастих конструкција

Основне предности просторних решеткастих конструкција су:

- Велика искориштеност попречног пресека па самим тиме и мала тежина конструкције,
- Мала висина конструкције у односу на распон ( $x/L = 1/15 - 1/25$ ),
- Велика крутост и мала деформација код великих распона без међуослонаца,
- Просторна расподела сила,
- Могућност серијске и индустријске производње унифицираних елемената,
- Велики обликовни потенцијал,
- Већа отпорност на пожарно деловање у односу на класичне решетке,
- Лака и брза монтажа.

Недостаци:

- Велик утрошак времена за радионичку израду елемената,
- Антикорозивна заштита,
- Просторно спајање великог броја штапова у чворовима,
- Дуготрајни статички прорачун класичним методама.

На сликама 2.7 и 2.8 можете видети разноврсну примену просторних решеткастих конструкција кроз неке од светски најпознатијих грађевина. На слици 2.9. се могу видети детаљи спајања једне просте решеткасте конструкције.



**Слика 2.7.** Ајфелов торањ у Паризу



**Слика 2.8.** Железничка станица у Лондону



Слика 2.9. Челични оквир троугаоне просторне решетке

### 2.3. Статички одређени носачи

Дефиницију статички одређених носача дато је када је било о речи о статичкој класификацији носача, код којих су за налажење непознатих довољно само услови равнотеже. У математичком смислу статички одређене носаче дефинише услов. [2]

Носачи о којима је овде реч састоје се од штапова, међусобо повезаних крутим угловима или зглобовима. Ако би се неки статички одређени носач разложио тако што би се све зглобне везе раставиле, добили бисмо поједине групе штапова међусобно повезаних крутим угловима. Такве групе штапова називамо гранама.

Статички одређени носачи састоје се од једне или више кинематички просто стабилних односно статичких одређених плоча. Најједноставнија статички одређена плоча је она плоча која се састоји од једног или више круто везаних штапова.

Свака кинематички просто стабилна односно статички одређена плоча састоји се од једне или више зглобно везаних грана.

Решеткасти носачи су решеткасте конструкције састављене од решеткастих дискова. Најједноставнија структура решеткастог диска састављена од штапова је троугао. Троугао је једина круга фигура која не мења свој облик под било којим оптерећењем у чворовима.

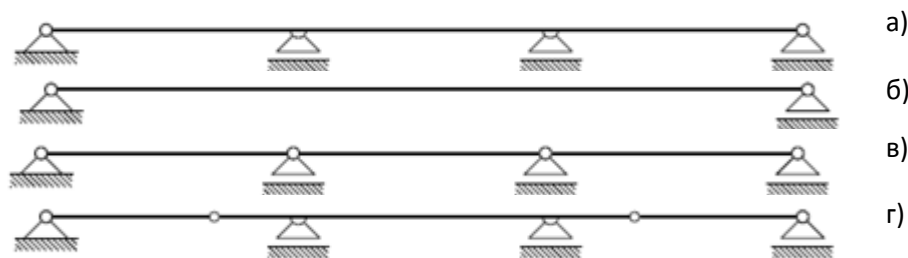
### 2.4. Статички неодређени носачи

Статички неодређени систем је систем који може остати у стању равнотеже при било каквом оптерећењу, али је број непознатих вредности сила у везама, спољним или унутарашњим или и спољним и унутарашњим, већи од броја независних једначина које израчунавају услове равнотеже, па те услове задовољава бесконачно много вредности сила.[3]

Претходну дефиницију називамо статиком. С кинематског гледишта статички неодређени систем геометријски непромењиви систем у којем је број веза, спољним или унутарашњим или једних и других, већи од најмањег броја дозвољено за његову геометријску непромењивост.

Статички неодређеним носачима називамо насаче у којима реакције ослонаца, момента укљештења и силе у пресецима не могу да се одреде само из услова равнотеже тог носача.

На слици 2.10.а приказан је континуални носач преко три поља тј. четири ослонаца. Тај је носач (као раванска конструкција) два пута статички неодређена има пет непознатих реакција, а у равни се могу поставити само три независне једначине равнотеже. Лако је видети и да са, кинематичког гредишта, носач има две прекобројне везе. Ако уклонимо други и трећи ослонац, добићемо просту греду (слика 2.10.б). Прекобројнима можемо сматрати и унутаршње везе: убацимо ли у пресек другом и трећем ослонцу зглобове претворимо ли, другим речима, круте везе, које преносе све три унутрашње силе, у зглобне, које не преносе моменте савијања настатаће низ простих греда (слика 2.10.в). Или додавањем зглобова у два пресека у првом и трећем пољу настаје Герберов носач (слика 2.10.г).



Слика 2.10. Статички неодређени носачи [1]

## 2.5. Начин спајања решетки

Конструкцију неког објекта чини више различитих елемената који чине јединствену целину, способну да преноси пројектом предвиђено оптерећење. У случају челичних конструкција, конструкција није монолитан систем, већ се састоји од делова одређених димензија, који се појединачно израђују у радионици, а потом међусобно повезују на градилишту. Стога се при изградњи челичних конструкција разликују следеће фазе:

- израда елемената (делова)
- конструкције у радионици,
- транспорт и
- монтажа на градилишту.

Том приликом се примењује низ поступака и операција неопходних за израду елемената конструкције од ваљаоничких производа, као и за њихово настављање и међусобно повезивање. Потреба за настављањем елемената произилази из чињеница да димензије конструкцијских елемената често превазилазе стандардне дужине ваљаоничких производа и габарите уобичајених транспортних средстава. Максимална дужина која може да се транспортује је 16м. Настављање и повезивање елемената челичних конструкција може да се оствари помоћу механичких спојних средстава (закивци, завртњеве, чепови итд.), или технолошким поступцима (заваривањем или лепљењем) или комбиновано. У зависности од места извођења, постоје две врсте наставака: радионички и монтажни наставци. [4]

*Радионички наставци* се изводе у радионици, где се припремљени ваљаонички производи међусобно спајају и формирају:

- просте елеменате,
- полусклопове и
- склопове,

Чије су димензије мање од габарита предвиђеног транспортног средства. У просте елементе спадају профили који су образовани заваривањем, или спајањем ваљаних производа

помоћу закивака. Полусклопови и склопови подразумевају спајање више профила у једну монтажну целину, као што је на пример стуб рама са лежишном плочом и укрућењима, или монтажни сегмент моста. Радионички наставци се најчешће изводе заваривањем, а ређе закивцима или завртњевима. Квалитет и димезије спојева зависе од величине и врсте утицаја које ти спојеви треба да прихвате.

*Монтажни наставци* се изводе на градилишту. Помоћу њих се повезују радионички сегменти (полусклопови или склопови) тако да образују јединствену конструктивну целину. Избор спојних средства за израду монтажних наставака зависи од величине и врсте утицаја које наставак треба да прихвати, од начина и брзине монтаже конструкције, као и од услова који владају на градилишту. Данас се монтажни наставци, због брзине извођења, квалитета наставка у градилишним условима и обезбеђења пројектоване геометрије конструкције, најчешће изводе помоћу завртњева, а ређе заваривањем. Помоћу завртњева се изводе монтажни наставци штапова и носача, наставци стубова, зглобне и круте везе подужних и попречних носача, везе решеткастих носача са ослоначким конструкцијама, итд. Монтажни наставци у завареној изради, изводе се углавном код статички оптерећених конструкција (у зградарству) за повезивање, слабије или средње напрегнутих, елемената. У мостоградњи се овакви наставци примењују код ортотропних плоча.

### 2.5.1. Закивци

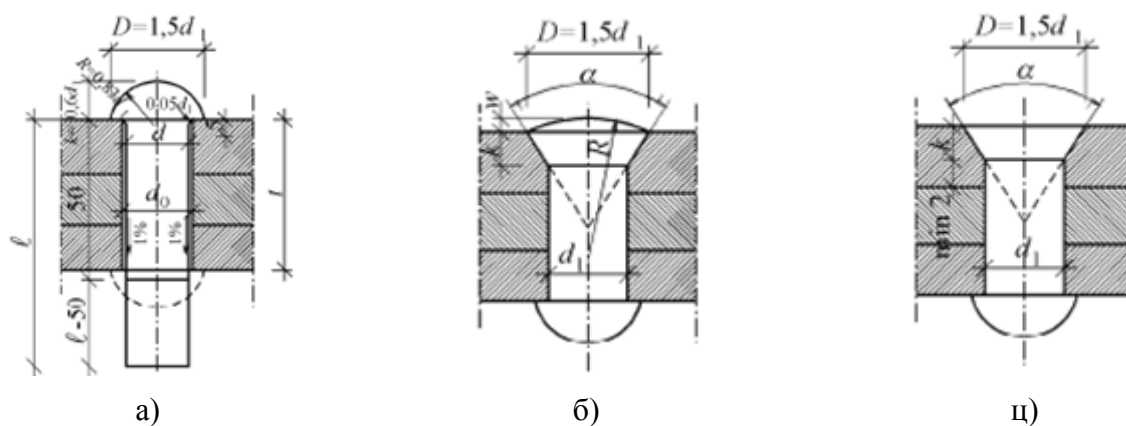
#### Опште о закивцима

Закивци као спојно средство се примењују од тридесетих година деветнаестог века и до данас су се показали као ефикасно и поуздано спојно средство. Везе изведне закивцима се добро понашају, како при статичком тако и при динамичком напрезању, јер закивци врше равномерни пренос силе дуж везе. Рупе у вези су добро испуњене материјалом закивка, па везе имају мала проклизавања и малу деформабилност. Данас се закивци примењују само за реконструкцију и ојачање постојећих конструкција израђених закивцима и ређе за израду динамички напрегнутих конструкција. Заваривање је последњих деценија, осим у специјалним случајевима, скоро потпуно потиснуло примену закивака за израду радионичких наставака, док су их завртњеви, због брзог и једноставног извођења наставака, заменили код израде монтажних наставака. [5]

#### Облици и димензије закивака

Закивак се састоји од цилиндричног тела (врата закивка) и главе закивка. У зависности од облика главе, разликују се:

- закивци са полукружном главом (слика 2.11.а),
- закивци са полуупуштеном главом (слика 2.11.б) и
- закивци са упуштеном главом (слика 2.11.ц).



**Слика 2.11.** - Различите врсте закивака: а) са полукружном главом; б) са полуупуштеном главом; ц) са упуштеном главом [5]

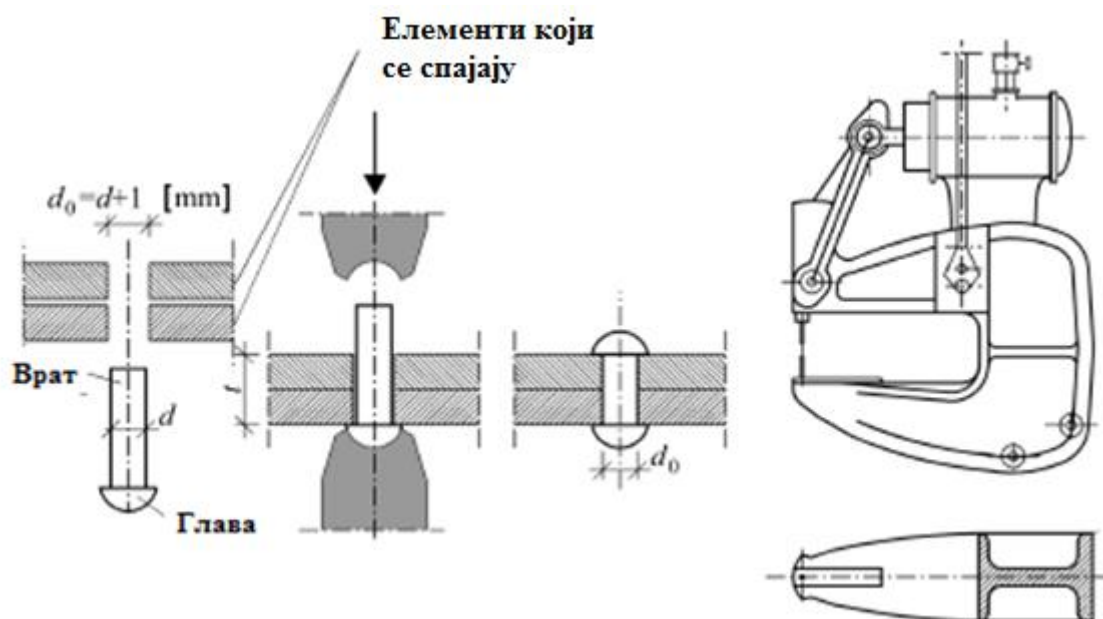
Закивци се израђују машинским путем од округлог челика, са затезном чврстоћом  $R_m=300-400$  МПа,  $R_m=380-470$  МПа,  $R_m=440-540$  МПа, респективно. Најчешће се примењују закивци са полукружном главом чији је врат конусан на дужини од 50 mm од главе закивка, са нагибом изводнице од 1% (слика 2.11.а), а цилиндричан на преосталој дужини. Пречник рупе за уградњу закивака ( $d_0$ ) је за 1 mm већи од пречника закивка ( $d$ ), то јест  $d_0 = d + 1$ .

Дужина врата закивка ( $l$ ) зависи од пречника закивка ( $d$ ) дебљине пакета лимова који се спајају ( $t$ ) и од начина израде друге главе закивка (слика 2.11.а):

$$l = t + 4 / 3 \cdot d_0 \text{ за машинско закивање,}$$

$$l = t + 7 / 4 \cdot d_0 \text{ за ручно закивање.}$$

Закивци се уграђују у претходно избушене рупе, загрејани до температуре која је погодна за ковање. Затим се поставља преса за закивање и врши се притисак на главу и врат закивка чиме се прво испуњава рупа у споју, а затим се обликује друга глава (слика 2.12.).



Слика 2.12. - Израда друге главе закивка и преса за закивање [5]

Избор пречника закивка зависи од дебљине пакета који се закива, због доброг испуњења рупе и спречавања кривљења усијаног врата закивка. Пракса је показала да дебљина пакета не би смела да пређе вредност:

$$t \leq 4,5 d_0 \quad \text{за закивке са полукружном главом и}$$

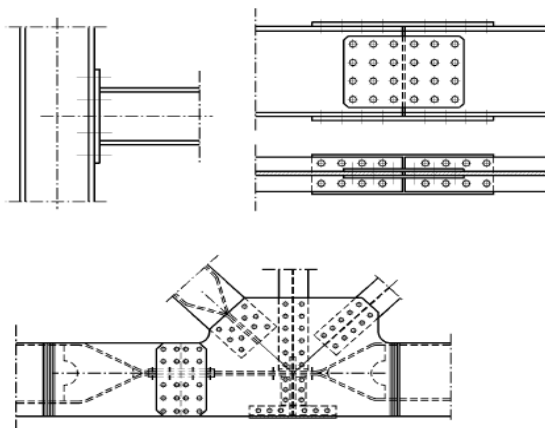
$$4,5 d_0 < t < 6,5 d_0 \quad \text{за закивке са полуупуштеном главом.}$$

## 2.5.2. Завртњевеи

### Опште о завртњевима

На самом почетку развоја челичних конструкција, као прва механичка спојна средства коришћени су обични завртњевеи. Они су, међутим, убрзо замењени закивцима због, у то време, скупе машинске израде и слабе отпорности на замор. Како је развојем машинске индустрије знатно убрзан и поједностављен процес производње завртњева, они су се поново наметнули као конкурентно механичко спојно средство.

Завртњевеи представљају савремено и ефикасно спојно средство за израду, претежно, монтажних наставака у зградарству и мостоградњи (слика 2.13.). Њихова примена је омогућила потпуну индустријализацију производње челичних конструкција. Они су данас, због низа несумњивих предности, скоро у потпуности заменили закивке при изради монтажних наставака.



Слика 2.13. - Примена завртњева у зградарству и мостogradњи [5]

Завртњеви се израђују у фабрици машинским путем, а на монтажи се врши само њихова уградња. На тај начин се добија веома уједначен квалитет свих завртњева у конструкцији.

За уградњу завртњева није потребна сложена опрема као за закивке, нити посебно квалификована радна снага. Уградња завртњева је једноставна и изводи је један или два радника. Временски услови не утичу на квалитет изведене везе, за разлику од веза остварених закивцима или заваривањем. Осим тога брзина уградње је већа него код закивака.

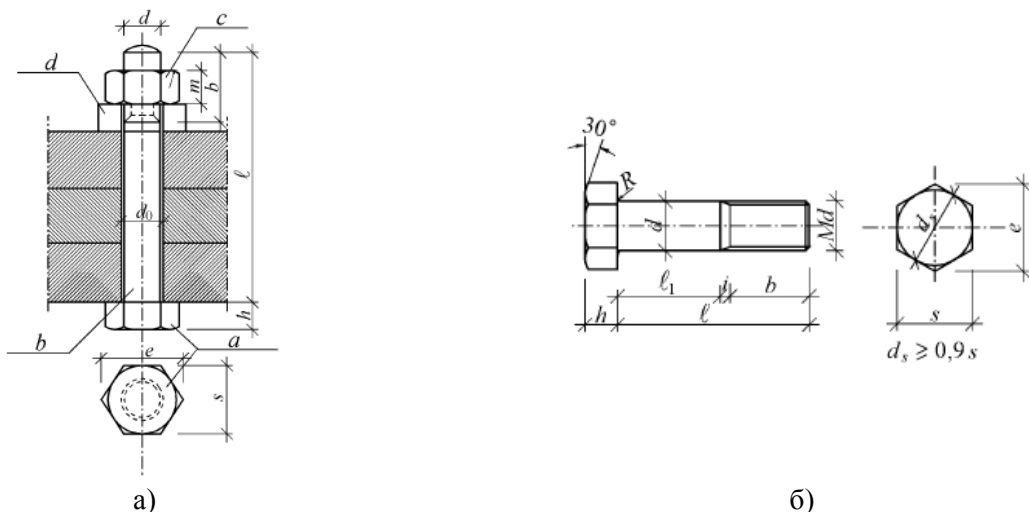
Без обзира што је основни материјал за сирови закивак јефтинији од завртња, ипак је, узимајући све наведене трошкове, веза изведена завртњевима јефтинија и контролисанијег квалитета.

Завртњевима се, као и закивцима, остварује тачкасто спајање елемената конструкције. Кроз два или више елемената који се спајају, буше се рупе, постављају завртњеви и навија навртка, све док се елементи међусобно не споје. После тога, веза је одмах способна да прихвати све статичке утицаје, при чему у завртњевима може да се јави смицање, притисак по омотачу рупе или затезање.

#### Облици и врсте обичних завртњева

Један комплет завртња састоји се из следећих делова, (слика 2.14.а):

- шестоугаоне главе (а),
- цилиндричног тела које се завршава навојем (б),
- шестоугаоне навртке са отвором у средини и навојем у унутрашњем делу отвора (с) и
- подложне плочице (подлошке) кружног или квадратног облика са отвором у средини (д).



Слика 2.14. - Делови и ознаке димензија обичних завртњева [5]

Називну меру завртња дефинише дебљина тела завртња на месту навоја ( $d$ ) па је ознака за завртањ  $Md$ . На пример,  $M20$  означава завртањ чији је пречник тела на месту навоја  $d=20\text{ mm}$ . Димензије свих делова завртња су стандардизоване према JUS-у M.B1.068. У челичним конструкцијама се употребљавају завртњеви са ISO, односно метричким навојем. Тако, поменута ознака за завртањ  $Md$  означава завртањ са метричким навојем. Раније су у употреби били завртњи са Витвортовим навојем у цоловним ( $"$ ) јединицама (нпр.  $1/2"$ ,  $5/8"$ ,  $3/4"$ ,  $7/8"$  и  $1"$ ). Основне димензије метричког навоја су приказане на слици 3.7а, где су :

$d$  номинални пречник завртња,

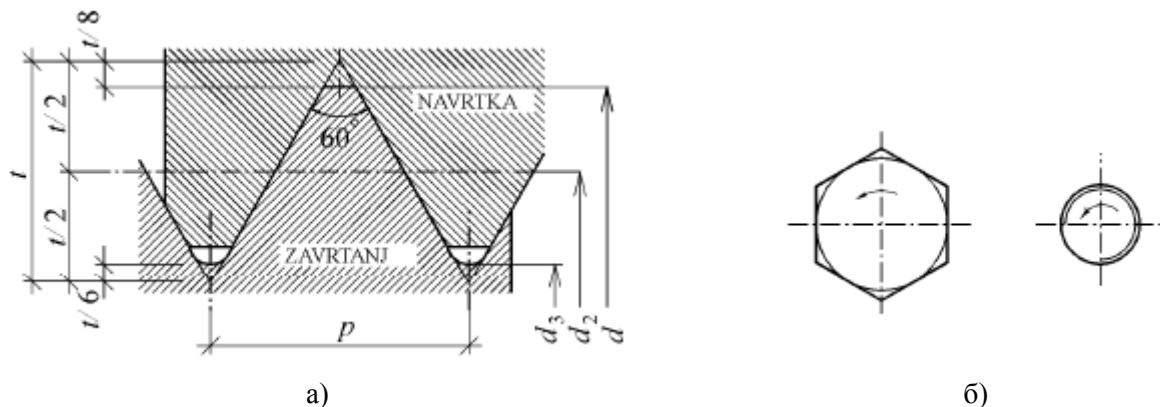
$d_2$  средњи пречник навоја ( $d_2 = d + 2 \cdot t/8 - 2 \cdot t/2 = d - 3/4 \cdot t$ ),

$d_3$  пречник језгра завртња ( $d_3 = d + 2 \cdot t/8 - 2 \cdot t + 2 \cdot t/6 = d - 17/12 \cdot t$ ),

$p$  корак навоја који зависи од пречника завртња (нпр. за  $M12\ p=1,75\text{ mm}$ ),

$t$  висина навоја која зависи од корака навоја ( $t = p/(2 \cdot \tan 30^\circ) = p \cdot 3/2 = 1,155 \cdot p$ ).

У пракси се најчешће користе завртњеви са десним навојем. Постоје и завртњеви са левим навојем и они су на глави завртња уочљиво обележени (слика 2.15.б).



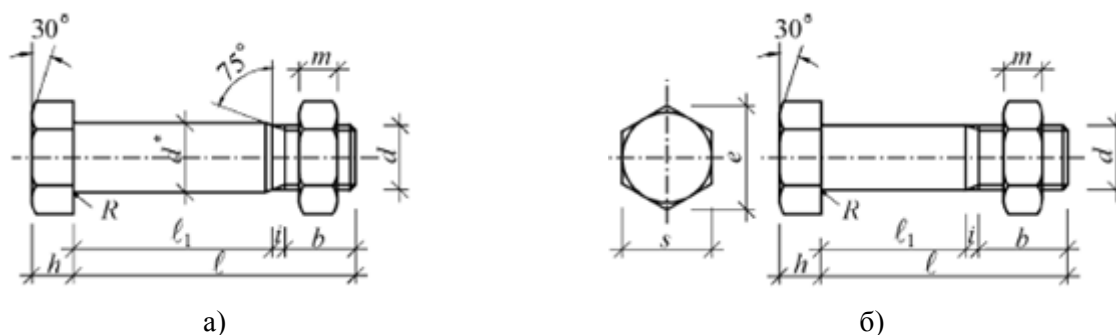
Слика 2.15.- Основне димензије метричког навоја и ознака навоја [5]

Најважнији део завртња је тело завртња. Оно има доминатну улогу у преношењу сила у смичућим спојевима, где је напрегнуто на смицање и притисак по омотачу рупе. Како оваква напрезања зависе директно од ефективног пречника завртња, то није допуштено да се у вези употреби завртањ чији навој улази у пакет који се спаја. Због тога се у грађевинским конструкцијама примењује подложна плочица дебљине  $8\text{ mm}$  да би, за завртњеве чија се дужина мења на  $5\text{ mm}$ , навој остао изван равни смицања.

Према тачности израде тела завртња, постоје две врсте завртњева:

– *подешени завртњеви* (или упасовани, или завртњеви са тачним налегањем), код којих се обрадом на стругу постиже разлика између пречника рупе и тела завртња  $\Delta d = d_0 - d \leq 0,3\text{ mm}$  (слика 2.16.а),

– *неподешени завртњеви* (или неупасовани, или завртњеви без тачног налегања) код којих је разлика између пречника рупе и тела завртња  $\Delta d = d_0 - d \geq 1,0\text{ mm}$  (слика 2.16.б). Ово одступање могућава да необрађени завртњеви могу лако да се уграде на монтажи, без претходне предмонтаже у радионици.



**Слика 2.16. - Обрађени и необрађени завртњеве [5]**

На примеру завртња M20 илустрована је разлика у димензијама обрађених и необрађених завртњева:

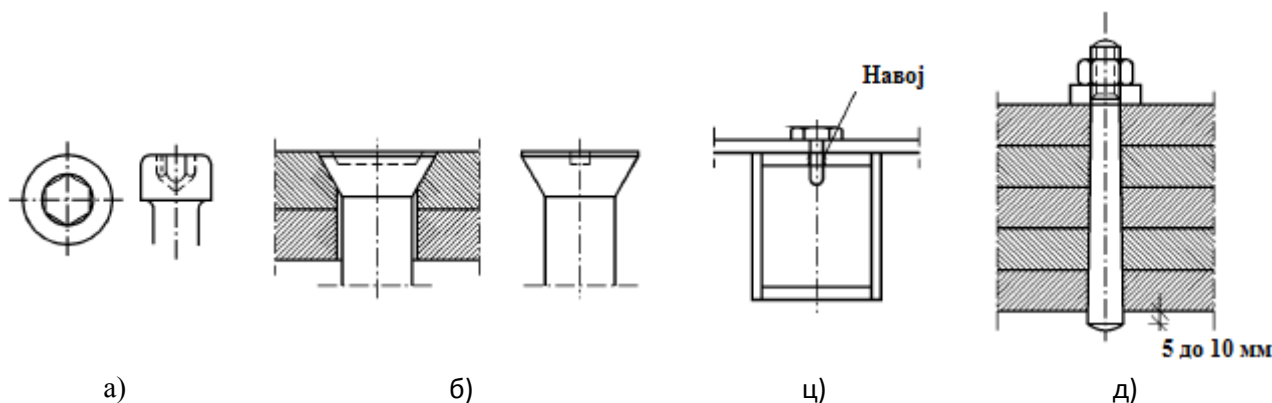
- *подешени завртањ M20*: номинални пречник  $d = 20 \text{ mm}$   
 пречник тела завртња  $d \approx 21 \text{ mm}$  (за прорачун)  
 пречник рупе  $d_0 = 21 \text{ mm}$
- *неподешени завртањ M20*: номинални пречник  $d = 20 \text{ mm}$   
 пречник тела завртња  $d = 20 \text{ mm}$   
 пречник рупе  $d_0 = 21 \text{ mm}$

Према Еврокоду 3 пречник рупе може да буде већи од пречника завртња и више од 1 mm, па тако, овај документ предвиђа следеће вредности за стандардне зазоре у рупи:

- 1 mm за завртњеве M12 и M14
- 2 mm за завртњеве M16 до M24
- 3 mm за завртњеве M27 и веће.

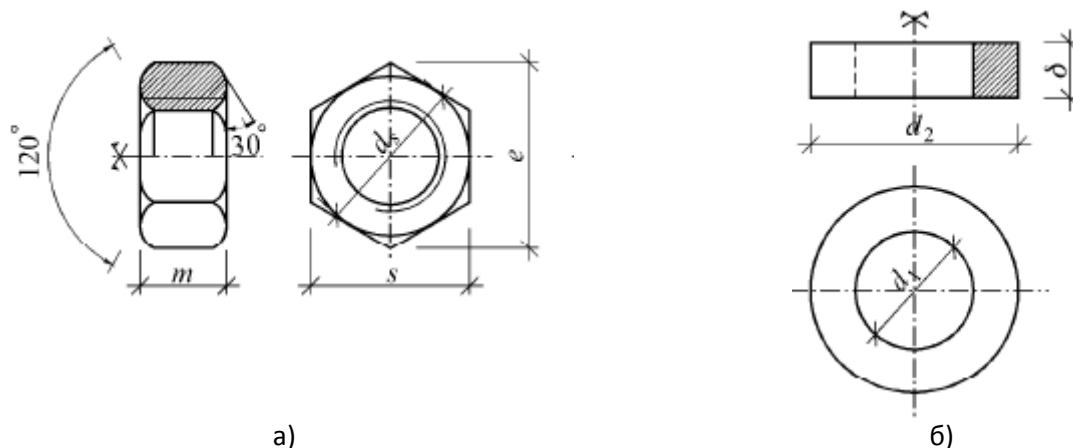
У посебним случајевима могу да се користе и специјални завртњеве, као што су:

- *Завртњеве са унутрашњом шестоугаоном главом* (слика 2.17.а), који се примењују углавном у спојевима код којих не постоји простор за постављање кључа за навијање навртке;
- *Завртњеве са упуштеном главом* (слика 2.17.б), у спојевима код којих се захтева да површина споја буде равна;
- *Завртњеве без навртке* (слика 2.17.ц), у неприступачним спојевима код којих се не може поставити навртка. У том случају се у елемент споја урезаује навој истог типа као и за навртку;
- *Конусни завртњеве* (слика 2.17.д), у спојевима са закивцима код којих је дебљина споја већа од допуштене. Тело завртња је конично са нагибом изводнице од 1% и нема главу него се тело испушта 5-10 mm изван споја. Прво се буши цилиндрична рупа, а онда се проширује тако да добије конусни облик. Навртка и подлошка су стандардних димензија.



**Слика 2.17. - Специјалне врсте завртњева [5]**

На слици 2.18. приказана је стандардна шестоугаона навртка и подложна плочица (подлошка) за обичне завртњеве.

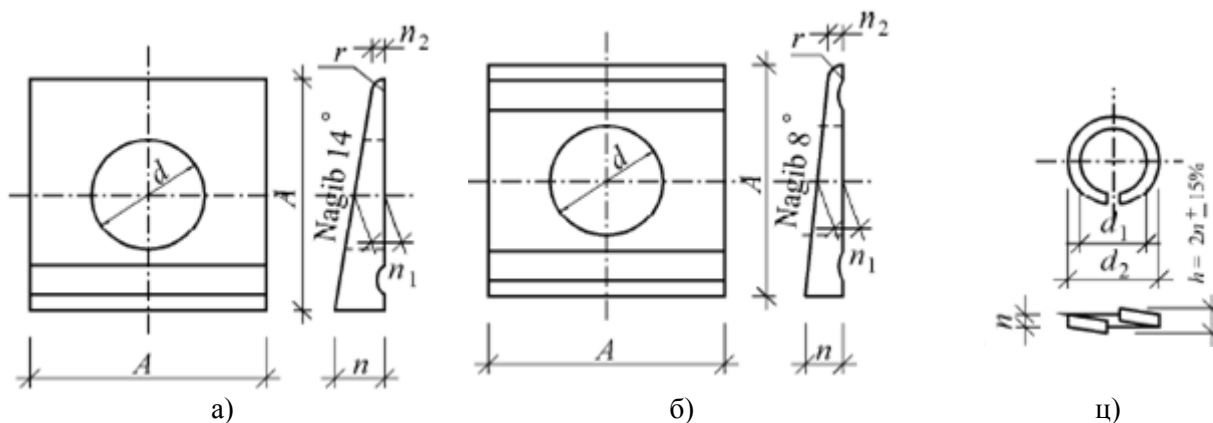


Слика 2.18. - Навртка и подложна плочица за обичне завртњеве [5]

Подложне плочице (подлошке) имају функцију да омогуће боље налегање навртке на спојне елементе, да спрече да се навој нађе у споју и да спрече ослањање навоја на зидове рупе приликом притезања навртке. Оне се увек постављају испод навртке. Израђују се у две класе израде према SRPS M.B2.015:

- класе А, са грубом израдом, без посебне обраде спољашњих површина и
- класе Б, са средње грубом израдом и са обрадом спољашњих површина.

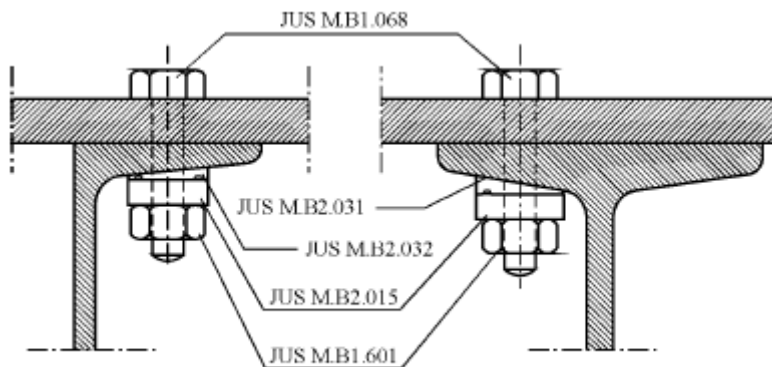
Код ваљаних профила са нагибом унутрашње површине ножица примењују се, поред обичних подложних плочица и косе подложне плочице, да би се обе површине ножица довеле у паралелан положај. Код I профила оне се израђују према SRPS M.B2.031 са нагибом од 14%, (слика 2.19.а), док код U профила имају нагиб 8% за профиле до U300, односно 5% за профиле U300 и веће, а израђују се према стандарду SRPS M.B2.032 (слика 2.19.б).



Слика 2.19.- Косе и еластичне подложне плочице [5]

У спојевима код којих је потребно да постоје одређена померања између елемената који се спајају, да би се избегло напрезање завртњева у правцу њихове осе (нпр. у горњем делу везе два кранска носача система просте греде), примењују се еластичне подлошке (слика 2.19.ц). Оне се примењују са обичном подлошком, а жељено померање у споју се постиже деформисањем ове подложне плочице. Напомиње се да при монтажи завртњева са еластичном подлошком не треба потпуно притегнути навртку, јер ако се тада деформише, еластична подлошка губи своју функцију.

Треба напоменути да косе подложне плочице служе само да изравнају нагибе на ножицама профила, а да се поред њих постављају и обичне подлошке (слика 2.20.).



Слика 2.20. - Распоред делова завртњева у вези са косим странама

### 2.5.3. Заваривање

#### Опште о заваривању

Заваривање је технолошки поступак за спајање истих или сличних метала. Спајање елемената се остварује уз помоћ високе температуре која изазива топљење додатног и основног материјала на месту споја. [6] Растопи основног и додатног материјала (електроде или жице за заваривање) се међусобно мешају и долази до њиховог физичког и хемијског сједињавања. Након хлађења долази до очвршћавања, чиме се ствара шав, као физички континуитет материјала. На овај начин се остварује континуалан спој елемената који се заварују.

Основни појмови карактеристични за заваривање (слика 2.21).

*Основни материјал* је материјал од кога су израђени елементи (делови) који се спајају заваривањем.

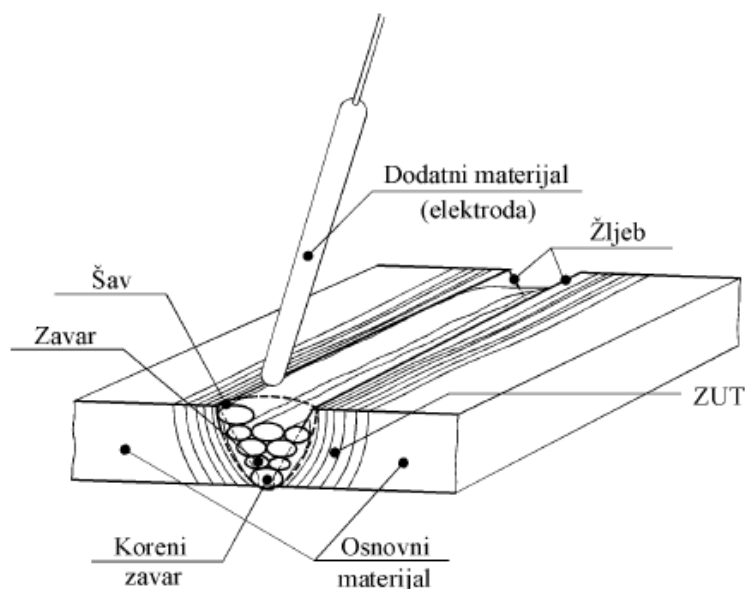
*Додатни материјал* је материјал (најчешће жица за заваривање или електрода) који се при заваривању топи и, мешањем са растопљеним металом основног материјала у зони шав, образује растоп који, након хлађења и очвршћавања, формира шав. Додатни материјал мора да се изабере на адекватан начин како би се омогућило што боље и брже попуњавање жљеба И добро сједињавање са основним материјалом. Поред тога, он мора да поседује и елементе за легирање растопа чија је функција да створи услове за заштиту шав од гасова из атмосфере и да омогући постепено хлађење растопљеног метала.

*Спој* одређује међусобни положај делова који се спајају.

*Шав* је материјализовано место спајања, односно материјал између делова који се спајају добијен топљењем додатног и основног материјала на месту споја.

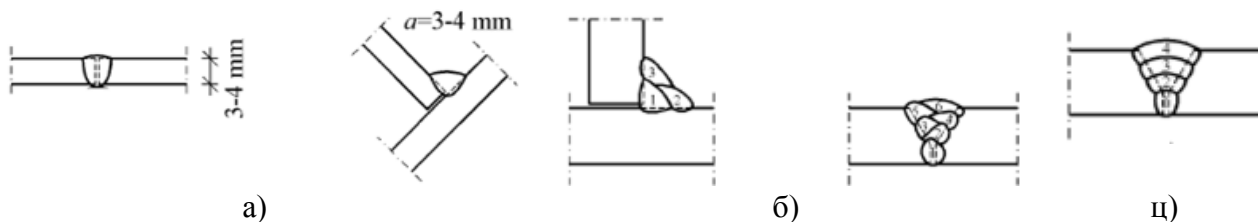
*Зона утицаја топлоте* (ЗУТ) је зона у основном материјалу непосредно уз шав у којој је, услед високих температура (преко 600 °C) које настају у растопу приликом заваривања, дошло до структурних промена.

*Жљеб* је простор предвиђен за депоновање додатног материјала приликом заваривања. Његов облик зависи од врсте споја и дебљине елемената који се спајају. Основна функција жљеба је да се омогући правилно растапање по дебљини основног материјала и добро испуњавање споја растопом. Код сучеоних шавова жљеб се формира обарањем ивица елемената који се спајају, док код угаоних шавова нису потребни никакви припремни радови, већ жљеб формирају ивице елемената који се спајају.



Слика 2.21. - Основни појмови

Завар је део шавовог отвора добијен топљењем додатног материјала у једном пролазу. Код сучеоних спојева танких елемената, дебљине 3-4 mm, као и код угаоних шавова мањих димензија ( $a=3-4$  mm) шав може да се изведе само једним заваром (слика 2.22а). У случају сучеоних спојева дебљих елемената и угаоних шавова већих димензија, шавови се изводе из више завара. Завар који се прво изводи назива се корени завар. Остали завари могу да се изводе паралелно са осом жљеба, (слика 2.22.б) или управно на њу (слика 2.22.ц).



Слика 2.22.- Израде шавова: а) из једног завара; б) из више завара паралелних са осом жљеба; ц) из више завара управних на осу жљеба

Заварљивост је способност материјала да може да се завари. Разликују се:

- оперативна заварљивост, као могућност да се оствари материјални континуитет између елемената који се спајају без појаве грешака,
- металуршка заварљивост, као услов добијања шавовог захтеваног квалитета и
- конструктивна заварљивост, као способност формираног шавовог отвора да се под оптерећењем понаша као и основни материјал.

### Врсте спојева и шавова

У зависности од међусобног положаја елемената који се заварују, разликују се следеће врсте спојева:

- сучеони спојеви,
- угаони или Т - спојеви,
- преклопни спојеви.

Поменути спојеви могу да се остваре помоћу различитих врста шавова. У савременим металним конструкцијама углавном се примењују следеће врсте шавова: [6]

- сучеони шавови са пуном пенетрацијом,
- сучеони шавови са делимичном пенетрацијом,
- угаони шавови,
- шавови у рупама (кружним или елиптичним),
- чеп шавови и
- ужљебљени шавови.

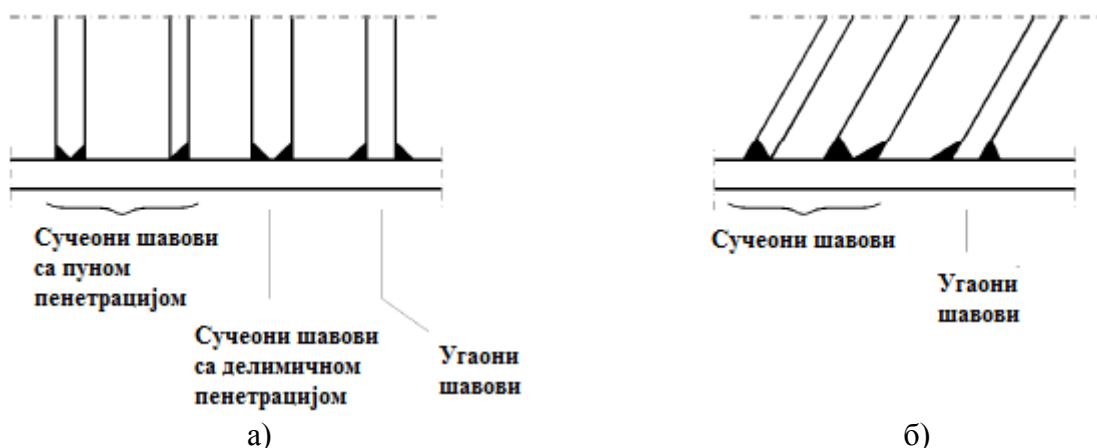
Који ће се шав применити зависи од врсте споја, врсте и величине напрезања, дебљине елемената који се спајају и технолошког поступка који се примењује при заваривању. Такође треба истаћи да се не могу користити сви типови шавова за све три врсте спојева.

Сучеони спојеви су спојеви код којих елементи који се спајају леже у истој равни. Ови спојеви могу да се изведу помоћу сучеоних шавова са пуном или делимичном пенетрацијом. Могу да се користе за спајање елемената исте (слика 2.23.а), или различите дебљине (слика 2.23б).



Слика 2.23. - Сучеони спојеви елемената: а) исте дебљине; б) различите дебљине

Угаони спојеви [6] се изводе између елемената који међусобно заклапају одређени угао, различит од 180°. Најчешће се елементи који се спајају налазе под правим углом (слика 2.24.а), али тај угао може да буде и кос (слика 2.24.б), у ком случају се угаони спојеви називају коси угаони спојеви. Угаони спојеви могу да се изведу помоћу сучеоних шавова са пуном или делимичном пенетрацијом или помоћу угаоних шавова.



Слика 2.24. - Угаони спојеви са сучеоним и угаоним шавовима: а) прави; б) коси

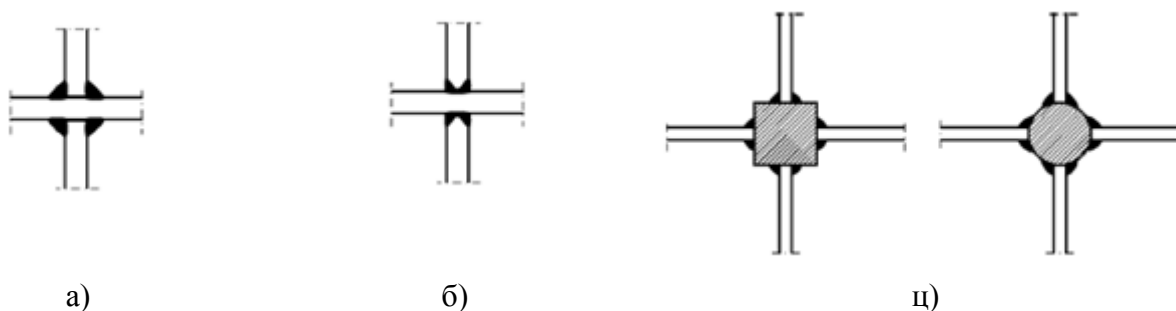
Када се један од елемената који се спајају не прекида на месту споја (слика 2.24.) спој се назива *непрекинути угаони спој*. [6] Уколико се оба елемента прекидају на месту споја (слика 2.25.) такви спојеви се називају *прекинути угаони спојеви*. Прекинуте спојеви могу да буду отворени (слика 2.25.а) и затворени (слика 2.25.б). Код отворених спојева елементи који се спајају су смакнати један у односу на други, тако да се њихове везе изводе помоћу угаоних

шавова. Код затворених спојева површине елемената су у истој равни тако да се изводи сучеони спој.



**Слика 2.25.** - Прекинути угаони спојеви: а) отворени; б) затворени

*Крстасти спојеви* представљају посебан вид угаоних спојева код којих елементи који се спајају образују крст (слика 2.26.). [6] Спој се остварује помоћу угаоних (слика 3.45а) или сучеоних шавова (слика 2.26.б), или њиховом комбинацијом. Овакви спојеви су неповољни, јер због нагомилавања шавова на једном месту долази до концентрације напона. При заваривању шавова са друге стране, долази до поновног загревања већ изведених шавова и основног материјала, што може да изазове прекристализацију основног материјала. Ово је посебно опасно код лимова мале дебљине. Због тога се крстасти спојеви избегавају код лимова тањих од 7 мм. Уколико је неопходно да се овакав спој изведе код изузетно оптерећених елемената, тада се прибегава посебном конструкционом обликовању. Сви елементи се прекидају на месту споја и умеће се квадратни или округли челични профил за који се заварују прекинути делови споја (слика 2.26ц).



**Слика 2.26.** - Крстасти спојеви: а) са угаоним шавовима; б) са сучеоним шавовима; са уметнутим округлим или квадратним челичним профилем

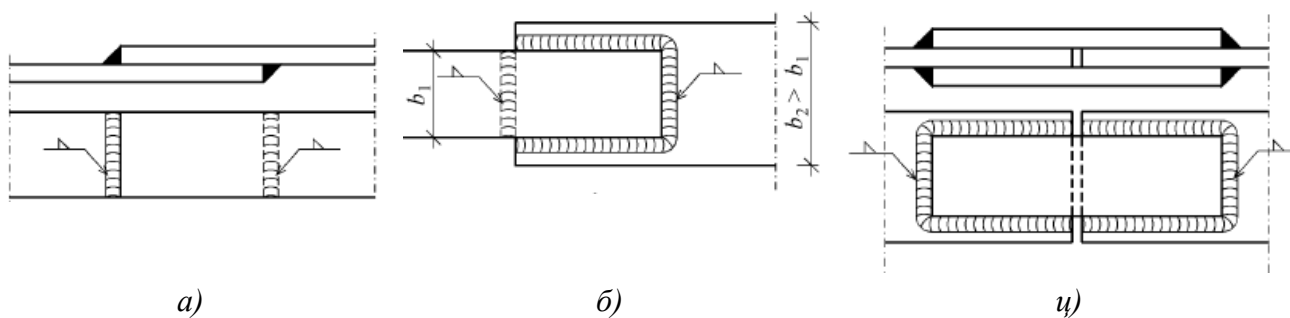
*Преклопни спојеви* су спојеви између преклопљених елемената који леже у две паралелне равни. [6] Постоје две врсте преклопних спојева:

- директни преклопни спојеви и
- преклопни спојеви са подвезицама.

*Директни преклопни спојеви* се јављају код елемената који су међусобно преклопљени на одређеној дужини. Спој се изводи помоћу угаоних шавова. Уколико су елементи који се спајају исте ширине, тада се изводе само чеони угаони шавови са обе стране (слика 2.27.а). Ако је један елемент ужи од другог, тада се изводе и бочни (подужни) и чеони угаони шавови (слика 2.27.б).

*Преклопни спојеви са подвезицама* се изводе када се елементи који се спајају налазе у истој равни. Са обе стране ових елемената се постављају подвезице, које треба да буду уже од основних елемената како би се омогућило њихово заваривање за елементе споја помоћу угаоних шавова по читавом обиму (слика 2.27.ц). Примена оваквих спојева је, са становишта напрезања шавова и самих елемената, повољнија, јер се избегава ексцентрично напрезање. Међутим,

неопходни су додатни елементи (подвезице) за остваривање везе, чиме се повећава утрошак материјала



**Слика 2.27.** - Преклопни спојеви: а) и б) директни преклопни спојеви; ц) преклопни спојеви са подвезицама

### 3. Аналитичко решавање сила у решетки

#### 3.1. Метода чворова

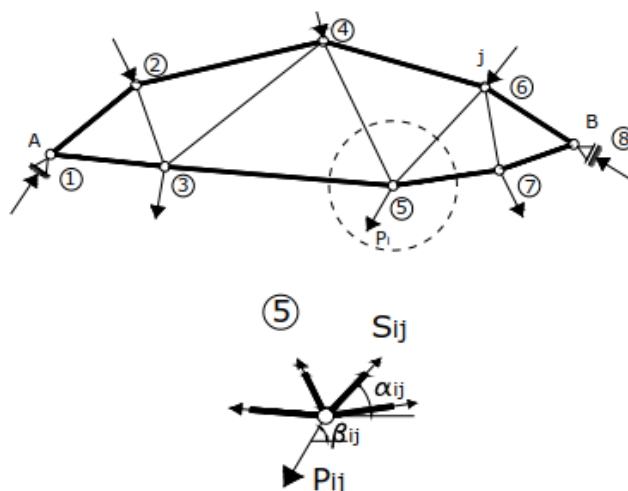
Ова метода се назива још и методом изрезивања чворова или методом равнотеже чворова. Према тој методи чворови се изрезају из решеткастог носача, односно, замишља се да се то урадило, па се постављају услови равнотеже. То уравнотежење могуће је проводити графичким и аналитичким поступцима. [1] Одређивање сила у решеткастом носачу методом чворова могућа су на два начина:

1. крећући се неким унапријед одређеним редосљедом од чвора до чвора, цртајући полигоне сила независно,
2. јединственим планом у којем се свака сила појављује једанпут, односно *Maxwell Cremoninim* планом сила.

Важно је напоменути да се у једном чвору могу поставити највише две једначине равнотеже у облику збира пројекција свих сила које делују на две непаралелне осе. Најчешће се одаберу хоризонтална и вертикална оса и постављају се услови равнотеже:

$$\sum X = 0; \sum Y = 0$$

Закључак је да је број непознатих у тако постављеним једначинама једнак броју штапова који су прикључени у чвор, па како се у једном чвору могу поставити највише две једначине равнотеже, поступак решавања решеткастих носача (како графичког, тако и аналитичког) започети у оном чвору у којем се састају два штапа (или већи број штапова уз услов да су у највише два штапа силе непознате) јер ће у том случају број непознатих бити једнак броју једначина. Следећи чвор у којем постављамо једначине равнотеже јест онај у којем су непознате две силе у прикљученим штаповима. На тај начин добија се једнозначно решив систем једначина. На слици 3.1. би поступак одређивања сила у решеткастом носачу започели у чвору 1 или 8, уз услов да раније одредили реакције које се јављају у ослоњцима А и В. Чворови у решетки означени су редосљедом како би се и решавали када би се поступак уравнотежавања започео у чвору 1. Тада би код графичког решавања морали за сваки чвор цртати засебан полигон, што би значило да би се сила у сваком штапу појављивала у два полигона. Таква је графичка конструкција неприкладна и непрегледна, па се јавља већа могућност гомилања грешака.



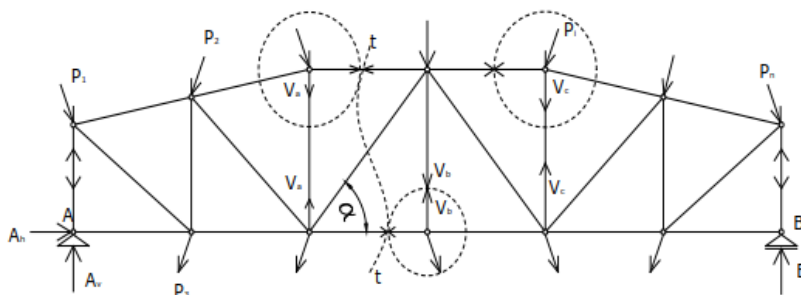
Слика 3.1. Пример решавања чвора

$$\sum S_{ij} \cos \alpha_{ij} = P_{ij} \cos \beta_{ij}$$

$$\sum S_{ij} \sin \alpha_{ij} = P_{ij} \sin \beta_{ij}$$

### 3.2. Ритерова метода

Ритерова методу је у основи аналитичка, али најчешће је у примени као графоаналитичка, због тога што се неке геометријске величине обично не одређују аналитички већ се директно мере из нацрта носача с оптерећењем. Геометријске величине до којих се на тај начин долази најчешће су кракови сила. Ова метода назива се и методом моментних тачака.



Слика 3.2.

Уколико се догоди да су од три штапа два паралелна, није могуће Ритеровом методом одредити силу у трећем штапу, јер се тада Ритерова тачка налази у бесконачности (на пресеку два паралелна штапа). У таквим случајевима примјењује се метода пројекција. Примена те методе приказана је на носачу са слике 3.2., који је оптерећен у свим чворовима силама произвољног правца и смера деловања. Посматра се део носача лево од пресека Т-Т. Сила у дијагонали може се одредити из суме пројекција на осу у свих сила које делују на посматрани део носача. Кад се та сума постави, добија се:

$$D \sin \alpha + A_v - \sum P_i \sin \beta_i$$

Односно,

$$D \sin \alpha = -(A_v - \sum P_i \sin \beta_i)$$

Израз у загради на десној страни горње једначине попречна је сила просте греде истог распона и оптерећења као задати решеткисти носач, па је општи израз за силу у дијагонали:

$$D_i = \mp \frac{1}{\sin \alpha_i T_i}$$

За посматрани пример и за силу у дијагонали у одабраном пресеку предзнак на десној страни је негативан. Ако би, међутим, просечна дијагонала била силазна, а не узлазна као што је у одабраном пресеку, предзнак на десној страни био би позитиван. Због тога су у општем изразу на десној страни стављени алтернативни предзнаци. Унутар пресеченог поља попречна је сила константна и не зависи о месту где је случајно назначен пресек.

Силе у штаповима вертикала ( $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$ ) у примеру на слици 3.2. не би требало тражити ни Ритеровом методом ни методом пројекција, иако би и то било могуће након претходног одређивања силе у четвртом пресеченом штапу. Те силе треба одређивати методом чворова. Начин изрезивања чворова приказан је на слици.

Силе у вертикалним ослонцима такође би се одређивале из равнотеже чворова, али то су једноставни случајеви када су у чвору само две непознате силе, а спољашне су пројектоване у смеру штапова.

Директно се добија да су те силе једнаке вертикалним компонентама реакција. У осталим вертикалама силе би се требале одредити Ритеровом методом.

## 4. Одређивање носивости заварених спојева по ЕУРОКОД-у

### 4.1. Прорачунска носивост угаоних шавова

#### 4.1.1. Дужина шавова

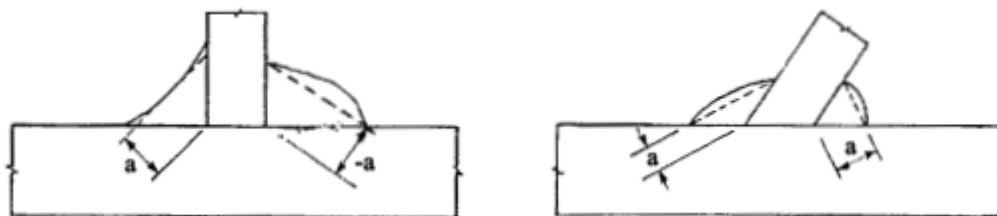
Ефективна дужина угаоних шавова  $l$  треба да буде једнака дужини на којој је шав пуне дебљине. [7] Она може да се узме као укупна дужина шавова умањена за дваструку ефективну дебљину шавова  $a$ . Уколико је шав пуне дебљине читавом дужином укључујући почетак и завршетак, није потребна редукција ефективне дужине, ни на почетку ни на крају шавова.

Преношење оптерећења не треба поверавати угаоним шавовима чија је ефективна дужина мања од 30 мм или 6 пута дебљина шавова  $a$ , узима се већа вредност.

#### 4.1.2. Ефективна дебљина угаоних шавова

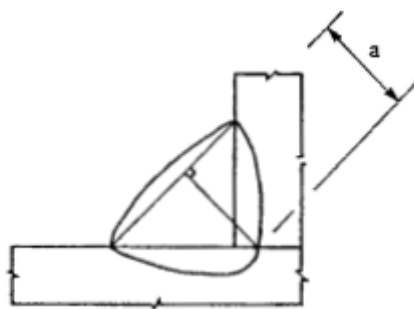
За ефективну дебљину угаоног шавова  $a$ , треба да се узме висина највећег троугла (једнакокраког или разнокраког) који може да се упише у тело шавова, која је мерена управно на спаљњу страну троугла, слика 4.1. [7]

Ефективна дебљина угаоног шавова не треба да буде мања од 3 мм.



Слика 4.1. Дебљина угаоног шавова [7]

При одређивању прорачунске носивости дубоко провареног угаоног шавова може да се узме у обзир његова додатна дебљина, слика 4.2, под условом да претходни тестови показују да се захтевани провар може доследно остварити.



Слика 4.2. Дебљина угаоног шавова са дубоким проваром [7]

### 4.2. Прорачунска носивост сучеоних шавова

#### 4.2.1. Шавови са пуним проваром

Треба усвојити да је прорачунска носивост сучеоних шавова са пуним проваром једнака прорачунској носивости слабијег од спојених делова, под условом да је шав изведен са погодним додатним материјалом који ће показати да узорци за испитивање затезањем узети из самог шавова

имају минималну границу развлачења и минималну чврстоћу на затезање не мање од одговарајућих вредности за основни материјал. [7]

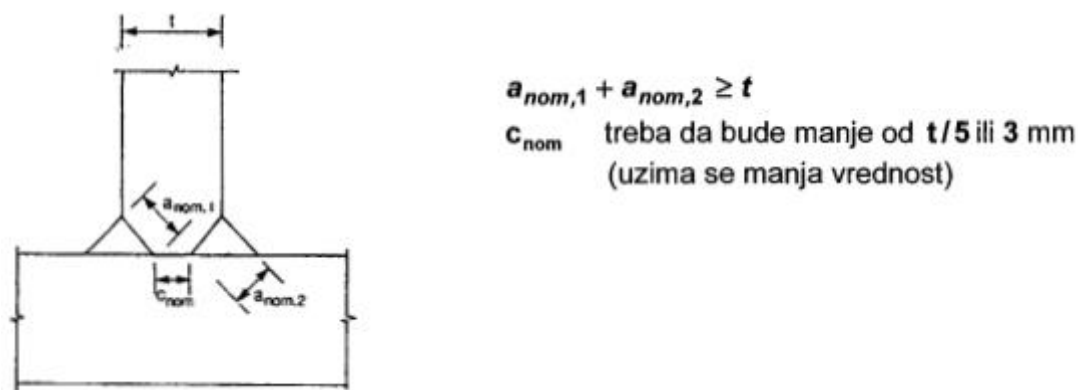
#### 4.2.2. Сучеони шавови са делимичним проваром

Прорацунска носивост сучеоних шавова са делимичним провером треба да се одреди применом методе за угаоне шавове са дубоким проваром.

Дебљина сучеоних шавова са делимичним проваром не треба да буде већа од дебљине провара који се доследно може остварити. [7]

#### 4.2.3. Сучеони Т спојеви

Прорацунска носивост сучеоног Т-споја, који се састоји од пара сучеоних шавова са делимичним проваром који су ојачани додатним угаоним шавовима, може да се одреди као код сучеоних шавова са пуним проваром, ако укупна номинална дебљина шавова, искључујући незаварени део, није мања од дебљине  $t$  дела који образује ребро Т-споја, под условом да незаварени део није већи од  $t/5$  или 3 мм, узима се мања вредност, видети слику 4.3. [7]



Слика 4.3. Ефективни пун провар сучеоног Т-споја [7]

Прорацунска носивост сучеоног Т-споја, који не испуњава захтеве треба да се одреди применом метода прорачуна за угаоне шавове, или за угаоне шавове са дубоким проваром у зависности од величине провара. Дебљина шавова треба да се одреди у складу са одредбама за угаоне шавове, или за сучеоне шавове са делимичним проваром које су релевантне.

## 5. Пример

### О конструкцији из примера

У оквиру овог рада конструисана је решеткаста конструкција којом се премошћава препрека у виду пруге, при чему се на решеткасту конструкцију ослања цев која „транспортuje“ воду за заливање обрадивих површина које се налазе са друге стране пруге. У оквиру овог рада анализирани су димензије електрифициране и неелектрифициране пруге у Републици Србији. Као референтна локација анализирани решеткасте конструкције узет је град Краљево, и то првенствено због нешто критичнијих вредности параметара који се односе на дејства снега и ветра. При конструисању је узето у обзир да се целокупна конструкција налази на равничарском терену који обилује ниском вегетацијом (нпр. њива). Неки од основних полазних података су приказани у табели 5.1.

**Табела 5.1.** Основни подаци потребни за конструисање решеткасте конструкције

|                                         |                                       |
|-----------------------------------------|---------------------------------------|
| Карактеристике цеви                     | $\varnothing 250 \times 5 \text{ mm}$ |
| Ширина пруге                            | $1435 \text{ mm}$                     |
| Висина електрификационог стуба          | $6700 \text{ mm}$                     |
| Ширина пруге до електрификационог стуба | $8200 \text{ mm}$                     |

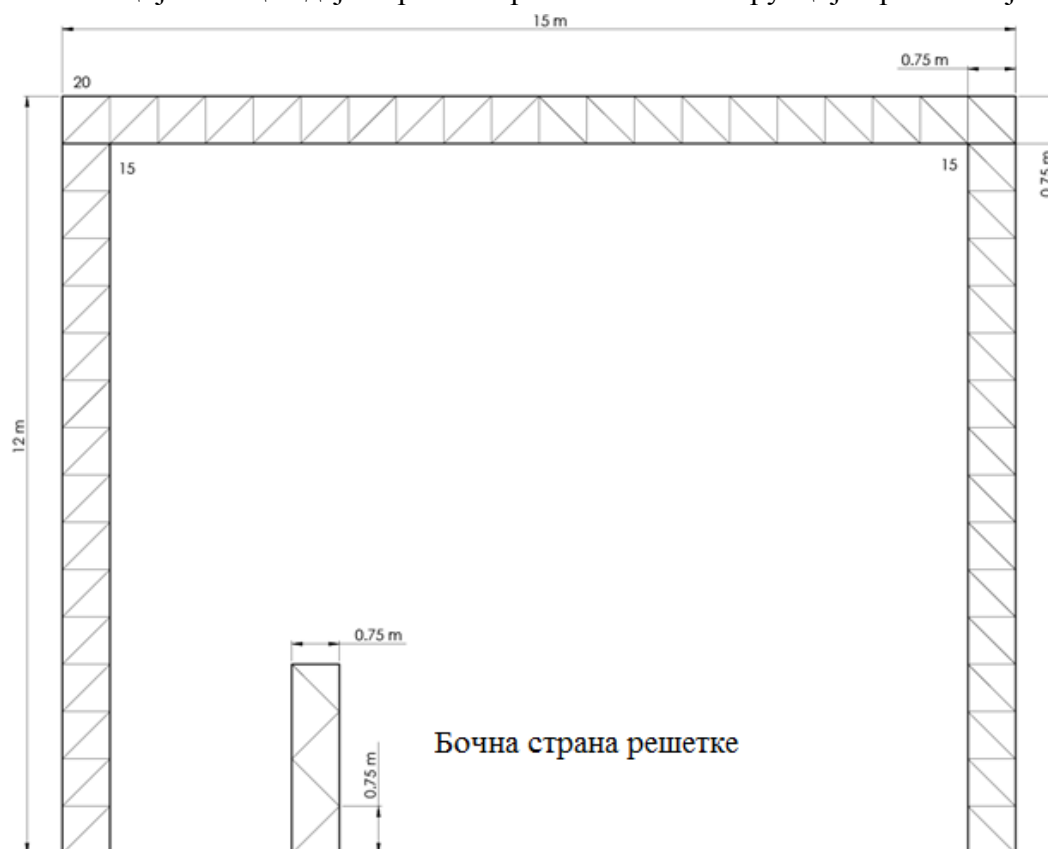
Због недостатка података усвојено је да је решеткасту конструкцију потребно удаљити око 2-3 метра од железничке инфраструктуре. Скица идејног решења приказана је на слици 5.1.



**Слика 5.1.** Скица идејног решења целокупне конструкције

Усвојено је да висина целокупне решеткасте конструкције износи 12 m док дужина износи 15 m. У питању је просторна решетка са две „раванске решетке“ које су повезане попречним штаповима. Једна раванска решеткаста секција је формирана у облику квадрата при чему његова висина и дужина износе по 0.75 m. Ако би се дотична секција посматрала у простору онда би једна просторна решеткаста секција изгледала као коцка, јер просторна ширина решетке износи 0.75 m. Што се тиче раванске секције, усвојено је да се дијагонална испуна налази под углом од 45°, при чему њена „математичка“ дужина износи око 1.061 m. Усвојено је да „математичка“ дужина вертикалне испуне износи 0.75 m.

На основу претходних података може се закључити да се горњи део решеткасте конструкције састоји од 20 индивидуалних решеткастих секција. Горњи део решеткасте конструкције се ослања на два стуба висине 11.25 m који се састоје од 15 индивидуалних решеткастих секција. Скица идејног решења решеткасте конструкције приказана је на слици 5.2.



**Слика 5.2.** Скица решеткасте решеткасте конструкције

Као материјал од којег ће се израдити целокупна решеткаста конструкција усваја се челик S 235 по Еврокоду ЕЦ 1993 1-1 [2]. Ово је нелегирани конструкциони челик, у SRPS стандарду налази се у фамилији челика Č035x, а његови најближи пандани су Č0361, Č0362 и Č0363. Карактеристике овог челика приказане су у табели 5.2.

**Табела 5.2.** Карактеристике челика S 235 за дебљине елемената мање од 40 mm, ( $t \leq 40 \text{ mm}$ )

|                            |                        |
|----------------------------|------------------------|
| Граница течења ( $R_e$ )   | 235 MPa                |
| Затезна чврстоћа ( $R_m$ ) | 360 MPa                |
| Густина ( $\rho$ )         | 7800 kg/m <sup>3</sup> |

### 5.1. Одређивање дејстава

У оквиру овог поглавља одређени су интензитети дејстава која настају од тежине цеви, тежине воде у цеви, тежине снега, тежине решеткасте конструкције, и притиска ветра на

решеткасту конструкцију.[9] Претходно оптерећења су анализирана за хоризонтални део решеткисте конструкције (стубови нису анализирани). Усвојено је да сва дејства делују у доњим чворовима решетки, при чему је овом претпоставком знатно упрошћен и убрзан део прорачуна који се односи на одређивање сила у штаповима решетки. У оквиру овог поглавља одређена су дејства која делују на једну раванску решетку, јер су оптерећења друге паралелне раванске решетки практично идентична.

### 5.1.1. Одређивање дејства снега, цеви, воде у цеви и решеткисте конструкције

Прво је одређена тежина цеви и воде по једној решеткистој секцији, при чему ова дејства не важе за ивичне решеткисте које ће се засебно анализирати.

$$G_{cev} = D \cdot \pi \cdot \delta \cdot l \cdot \rho \cdot g = 0.25 \cdot \pi \cdot 0.005 \cdot 0.75 \cdot 7800 \cdot 9.81 = 225.364 \text{ N}$$

$$G_{vode} = \frac{D_{un.cevi}^2 \cdot \pi}{4} \cdot l \cdot \rho \cdot g = \frac{0.24^2 \cdot \pi}{4} \cdot 0.75 \cdot 1000 \cdot 9.81 = 332.854 \text{ N}$$

Пошто се ова дејства преносе на две раванске решетки, укупно дејство по чвору за једну раванску решетку представља половину горе израчунатих вредности. Пре одређивања тежине решеткисте конструкције потребно је грубо усвојити профиле од којих би се израдила анализирана конструкција. На основу интуиције усваја се профил 60x40x3.2 као појасни профил, при чему његова маса на 0.75 м износи 3.35 кг (одређено коришћењем софтвера *SolidWorks*). Пошто се ове два ова профила налазе на једној секцији онда тежина појаса износи:

$$G_{pojasa} = 2 \cdot 3.35 \cdot 9.81 = 65.727 \text{ N}$$

Као профил испуне, усваја се профил 30x30x3.2. Његова маса на 1.061 м износи 2.620 кг, док његова маса на 0.75 м износи 1.8525 кг. Коначно се може израчунати тежина испуне:

$$G_{dij.ispune} = 2.620 \cdot 9.81 = 25.702 \text{ N}$$

$$G_{ver.ispune} = 1.8525 \cdot 9.81 = 18.173 \text{ N}$$

Оптерећење од снега се за задату локацију може срачунати коришћењем Еврокода 1991 1-1 [8],

$$s_k = (0.264 \cdot Z - 0.002) \cdot \left[ 1 + \left( \frac{A}{256} \right)^2 \right]$$

где је:

Z – број зоне, усваја се Z=1 као најмања вредност за централно источно подручје,

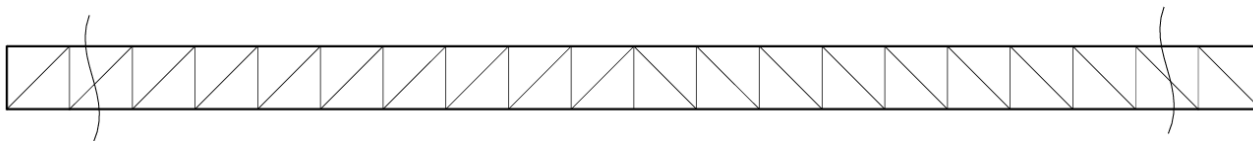
A – надморска висина локације изнад нивоа мора.

$$s_k = (0.264 \cdot 1 - 0.002) \cdot \left[ 1 + \left( \frac{500}{256} \right)^2 \right] = 1.261 \frac{kN}{m^2}$$

Усваја се да је свака секција изложена дејству снега на површини од 0.25 м<sup>2</sup>. На основу овог податка, ово дејство по решеткистој секцији износи:

$$G_{snega} = 0.25 \cdot 1261 = 315.25 \text{ N}$$

Пошто су позната дејства по једној решеткастој секцији, сада је потребно израчунати укупно дејство на 17 решеткастих секција које се налазе у средини решеткасте конструкције (између два пресека), као што је приказано на слици 5.3.



**Слика 5.3.** Анализирани део решетке

$$G_{ukupno} = 17 \cdot \left( \frac{G_{cev} + G_{vode}}{2} + G_{pojasa} + G_{snega} + G_{dij.ispune} + G_{ver.ispune} \right)$$

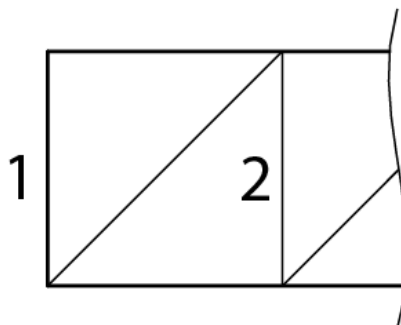
$$G_{ukupno} = 17 \cdot \left( \frac{225.364 + 332.854}{2} + 65.727 + 315.25 + 25.702 + 18.173 \right)$$

$$G_{ukupno} = 11967.337 \text{ N}$$

Оптерећење по чвору (17 чворова) за централни део решетке износи износи:

$$G_{cvora \text{ cent.}} = \frac{11967.337}{17} = 703.961 \text{ N}$$

Специјалан случај представљају по две ивичне решеткасте секције са сваке стране и то првенствено због кривине за цев. На слици 5.4. приказан је део решеткасте конструкције који је анализиран у даљем тексту.



**Слика 5.4.** Ивични део решеткасте конструкције (са леве стране)

Првенствено је потребно израчунати дужину кривине, при чему је усвојено да је централни полупречник кривине износи 375 мм. На основу овога се може израчунати четвртина обима круга која износи:

$$\frac{2 \cdot r \cdot \pi}{4} = \frac{2 \cdot 375 \cdot \pi}{4} = 589.049 \text{ mm}$$

На *штан* 2 који је приказан на слици 5.4. усвојено је да делује дејство од 375 мм цеви са водом десно од штапа и дејство од 589.049 мм цеви са водом са леве стране. Друга претходно израчуната дејства ће се такође узети у обзир (нпр. снег). Ово дејство се такође равномерно преноси на две раванске решетке, па стога дејство по једној раванској решетки износи половину вредности израчунатих у доњим изразима.

$$G_{cev} = D \cdot \pi \cdot \delta \cdot l \cdot \rho \cdot g = 0.25 \cdot \pi \cdot 0.005 \cdot (0.375 + 0.589049) \cdot 7800 \cdot 9.81 = 289.682 \text{ N}$$

$$G_{vode} = \frac{D_{un.cevi}^2 \cdot \pi}{4} \cdot l \cdot \rho \cdot g = \frac{0.24^2 \cdot \pi}{4} \cdot (0.375 + 0.589049) \cdot 1000 \cdot 9.81 = 427.839 \text{ N}$$

Укупно оптерећење у овом чвору износи:

$$G_2 = \frac{G_{cev} + G_{vode}}{2} + G_{snega} + G_{pojasa} + G_{dij.ispune} + G_{ver.ispune}$$

$$G_2 = \frac{289.682 + 427.839}{2} + 315.25 + 65.727 + 25.702 + 18.173 = 783.612 \text{ N}$$

На *штан* 1 на слици 5.4. делују дејства чији је интензитет упола мањи, ова претпоставка се првенствено односи на дејства која настају од тежине снега, тежине појаса и дијагоналне

испуне. На основу скица се такође може уочити да на конструкцију такође делује и тежина једне вертикалне испуне. Тежина цеви и воде се не узима у обзир јер она не делује на овај штап.

$$G_1 = \frac{G_{snega} + G_{pojasa} + G_{dij.ispune}}{2} + G_{ver.ispune}$$

$$G_1 = \frac{315.25 + 65.727 + 25.702}{2} + 18.173 = 221.5125 \text{ N}$$

### 5.1.2. Одређивање притиска ветра

Одређивање силе ветра представља нешто дужи и сложинији прорачун, тако да је тачно одређивање ове вредности извршено тек онда када су у потпуности одређени профили од којих ће се израдити анализирана решеткаста конструкција. У оквиру овог поглавља одређен је притисак ветра за анализиране услове, при чему ће се касније ова вредност ће се користити за одређивање дејства ветра који делује на анализирану конструкцију конструкцију. Дејство ветра је израчунато коришћењем Еврокода 1991 1-4 [5].

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,o}$$

где је,

$v_b$  – основна брзина ветра,

$c_{dir}$  – коефицијент правца, препоручена вредност  $c_{dir} = 1$ ,

$c_{season}$  – коефицијент сезонског деловања препоручена вредност  $c_{season} = 1$ ,

$v_{b,o}$  – фундаментална вредност основне брзине ветра.

Вредност основне брзине ветра ( $v_{b,o}$ ) израчуната је на основу SRPS U.C7.110, и то за град Краљево.

$$v_{b,o} = 19 \text{ m/s}$$

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,o} = 1 \cdot 1 \cdot 19 = 19 \text{ m/s}$$

Сада се може одредити брзина ветра на висини конструкције:

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_{(0)}(z) \cdot v_b$$

где је:

$v_m(z)$  – средња брзина ветра,

$c_r(z)$  – коефицијент храпавости,

$c_{(0)}(z)$  – коефицијент топографије,  $c_{(0)}(z) = 1$ .

На основу терена на којем би се анализирана решеткаста конструкција налазила, усвојено је да се за одређивање бројних фактора користе карактеристике које се односе на терен категорије II. Терен ове категорије је првенствено усвојено због чињенице да се у близини решеткасте конструкције налазе стубови који својим обликом и димензијама подсећају на дрвеће.

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$$

где је:

$k_r$  – коефицијент терена,

$z$  – висина за коју се анализира промена брзине ветра,

$z_0$  – дужина храпавости.

Висина за коју се анализира висина ветра мора бити у следећим границама:

$$z_{min} \leq z \leq z_{max}$$

$z_{min} = 2 \text{ m}$  – за терен категорије II

Горњи услов је овим задовољен.

$$k_r = 0.19 \cdot \left( \frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0.07}$$

$z_{0,II} = 0.55 \text{ m}$  – за терен категорије II,

$z_0 = 0.05 \text{ m}$  – за терен категорије II.

$$k_r = 0.19 \cdot \left( \frac{0.05}{0.55} \right)^{0.07} = 0.1606$$

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) = 0.19 \cdot \ln \left( \frac{11}{0.05} \right) = 1.025$$

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_{(0)}(z) \cdot v_b = 1.025 \cdot 1 \cdot 19 = 19.475 \text{ m/s}$$

Сада је потребно одредити ударни притисак ветра:

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2$$

где је:

$I_v(z)$  – турбуленција ветра, усваја се  $I_v(z) = 0$  односно да нема турбуленције ветра,

$\rho$  – густина, препоручена вредност  $\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3$ .

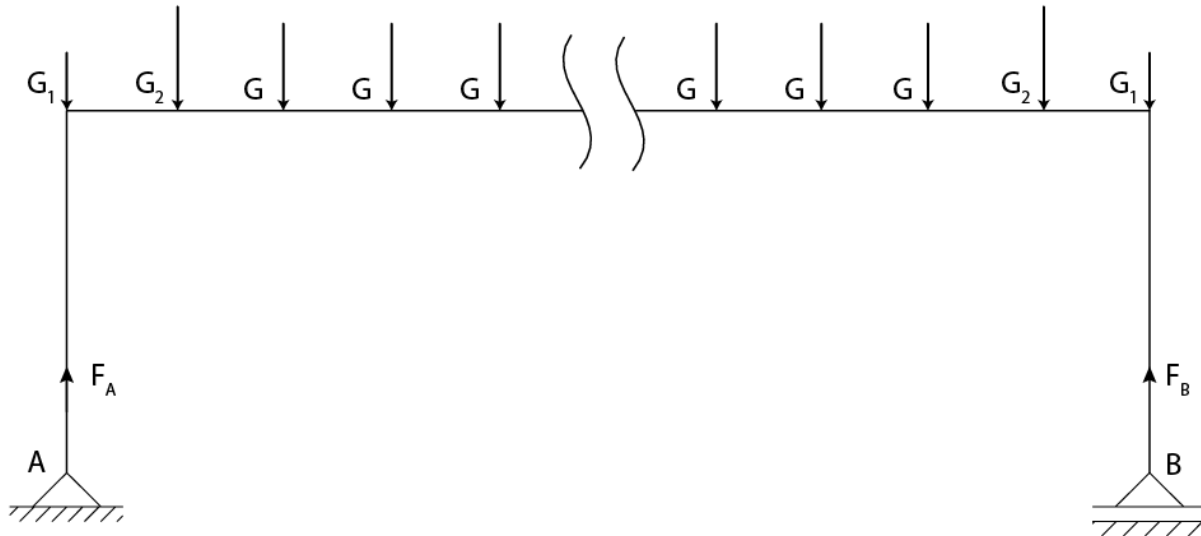
$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot 0] \cdot \frac{1}{2} \cdot 1.25 \cdot (19.475)^2 = 237.047 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} = 2325.431 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

## 5.2. Прорачун хоризонталног дела решетке

У оквиру овог поглавља првенствено су одређени отпори ослонаца, па затим силе у карактеристичним штаповима решетке. Затим је извршено димензионисање појасева и штапова испуне на основу најоптерећенијих штапова. Хоризонтални део решетке је анализиран првенствено јер је он најоптерећенији део целокупне конструкције.

### 5.2.1. Одређивање отпора ослонаца

Отпори ослонаца су одређени за раванску решетку која је упрошћено приказана на *Слици 5.3.* Оптерећења су приказана у облику концентрисаних сила у чворовима, интензитети сила се разликују на основу вредности које су израчунате у оквиру претходног поглавља. Димензије греде приказане на слици 5.5.



**Слика 5.5.** Скица решеткасте конструкције потребна за одређивање отпора ослонаца

На основу слике изнад може се извршити одређивање отпора ослонаца:

$$F_t = 0 \Rightarrow 2 \cdot F_A - 2 \cdot (G_1 + G_2) - 17 \cdot G$$

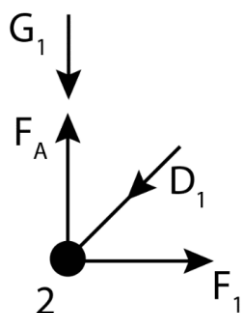
$$F_t = 0 \Rightarrow 2 \cdot F_A = 2 \cdot (221.5125 + 732.867) + 17 \cdot 703.961 = 13876.1 \text{ N}$$

$$F_A = 6938.05 \text{ N}$$

### 5.2.2. Одређивање сила у штаповима решетке

Захваљујући симетричности решетке потребно је одредити силе у штаповима само у једној половини решетке. Првенствено је извршено означавање штапова и чворова решетке, одговарајуће скице приказане су у Додатку. Потребно је напоменути да штапови  $V_1$  и  $F_6$  не носе никакво оптерећење већ представљају констукционе штапове који олакшавају неке друге операције (нпр. одржавање, визуелну контролу итд.). Из ових разлога усвојено је да силе у овим штаповима износе  $V_1 = F_6 = 0 \text{ N}$ . Због ове чињенице анализа сила у Чвору 1 није ни извршена.

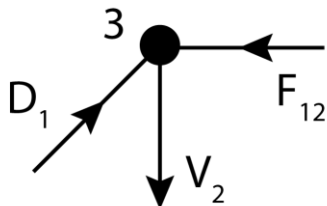
Сада је потребно извршити анализу сила у Чвору 2, при чему је шема сучељних сила приказана на слици 5.6.



Слика 5.6. Систем сучељних сила за чвор 2

$$\begin{aligned} \sum F_t = 0; -D_1 \cdot \sin 45^\circ + F_A - G_1 &= 0 \Rightarrow D_1 = \frac{F_A - G_1}{\sin 45^\circ} \\ D_1 &= \frac{6938.05 - 221.5125}{\sin 45^\circ} = 9498.618 \text{ N} \\ \sum F_a = 0; -D_1 \cdot \cos 45^\circ + F_1 &= 0 \\ -D_1 \cdot \cos 45^\circ &= -F_1 \Rightarrow F_1 = D_1 \cdot \cos 45^\circ \\ F_1 &= 9498.618 \cdot \cos 45^\circ = 6716.537 \text{ N} \end{aligned}$$

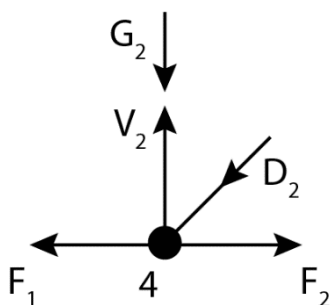
Сада је потребно извршити анализу сила у Чвору 3, при чему је шема сучељних сила приказана на слици 5.7.



Слика 5.7. Систем сучељних сила за чвор 3

$$\begin{aligned} \sum F_t = 0; D_1 \cdot \sin 45^\circ - V_2 &= 0 \Rightarrow V_2 = D_1 \cdot \sin 45^\circ \\ V_2 &= 9498.618 \cdot \sin 45^\circ = 6716.537 \text{ N} \\ \sum F_a = 0; D_1 \cdot \cos 45^\circ - F_{12} &= 0 \\ F_{12} &= D_1 \cdot \cos 45^\circ \\ F_{12} &= 9498.618 \cdot \cos 45^\circ = 6716.537 \text{ N} \end{aligned}$$

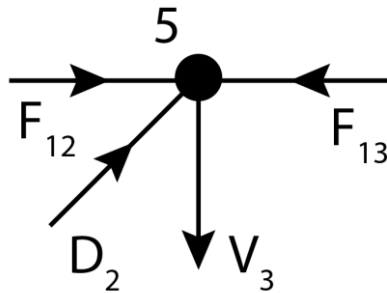
Сада је потребно извршити анализу сила у Чвору 4, при чему је шема сучељних сила приказана на слици 5.8.



Слика 5.8. Систем сучељних сила за чвор 4

$$\begin{aligned} \sum F_t = 0; -D_2 \cdot \sin 45^\circ + V_2 - G_2 &= 0 \Rightarrow D_2 = \frac{V_2 - G_2}{\sin 45^\circ} \\ D_2 &= \frac{6716.537 - 732.867}{\sin 45^\circ} = 8462.187 \text{ N} \\ \sum F_a = 0; -D_2 \cdot \cos 45^\circ - F_1 + F_2 &= 0 \\ F_2 &= D_2 \cdot \cos 45^\circ + F_1 \\ F_2 &= 8462.187 \cdot \cos 45^\circ + 6716.537 = 12700.206 \text{ N} \end{aligned}$$

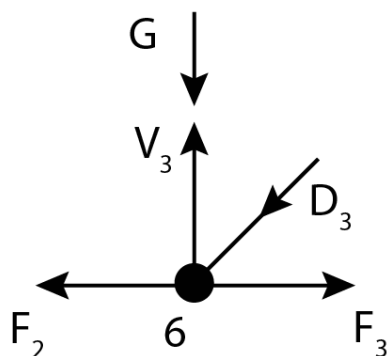
Сада је потребно извршити анализу сила у *Чвору 5*, при чему је шема сучељних сила приказана на слици 5.9.



Слика 5.9. Систем сучељних сила за чвор 5

$$\begin{aligned}\sum F_t &= 0; D_2 \cdot \sin 45^\circ - V_3 = 0 \\ V_3 &= D_2 \cdot \sin 45^\circ \\ V_3 &= 8462.187 \cdot \sin 45^\circ = 5983.67 \text{ N} \\ \sum F_a &= 0; D_2 \cdot \cos 45^\circ + F_{12} - F_{13} = 0 \\ F_{13} &= D_2 \cdot \cos 45^\circ + F_{12} \\ F_{13} &= 8462.187 \cdot \cos 45^\circ + 6716.537 = 12700.206 \text{ N}\end{aligned}$$

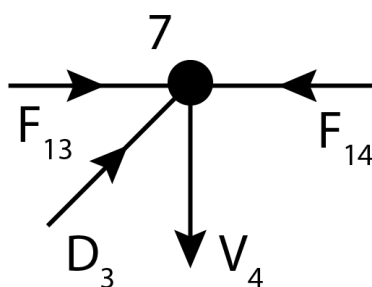
Сада је потребно извршити анализу сила у *Чвору 6*, при чему је шема сучељних сила приказана на слици 5.10.



Слика 5.10. Систем сучељних сила за чвор 6

$$\begin{aligned}\sum F_t &= 0; -D_3 \cdot \sin 45^\circ + V_3 - G = 0 \Rightarrow D_3 = \frac{V_3 - G}{\sin 45^\circ} \\ D_3 &= \frac{5983.67 - 703.961}{\sin 45^\circ} = 7466.636 \text{ N} \\ \sum F_a &= 0; -D_3 \cdot \cos 45^\circ - F_2 + F_3 = 0 \\ F_3 &= D_3 \cdot \cos 45^\circ + F_2 \\ F_3 &= 7466.636 \cdot \cos 45^\circ + 12700.206 = 17979.915 \text{ N}\end{aligned}$$

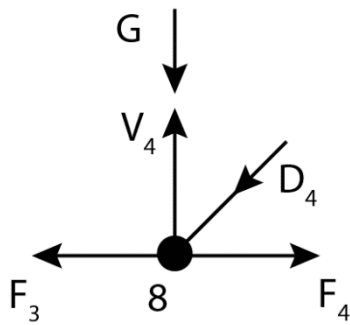
Сада је потребно извршити анализу сила у *Чвору 7*, при чему је шема сучељних сила приказана на слици 5.11.



Слика 5.11. Систем сучељних сила за чвор 7

$$\begin{aligned}\sum F_t &= 0; D_3 \cdot \sin 45^\circ - V_4 = 0 \\ V_4 &= D_3 \cdot \sin 45^\circ \\ V_4 &= 7466.636 \cdot \sin 45^\circ = 5279.71 \text{ N} \\ \sum F_a &= 0; D_3 \cdot \cos 45^\circ + F_{13} - F_{14} = 0 \\ F_{14} &= D_3 \cdot \cos 45^\circ + F_{13} \\ F_{14} &= 7466.636 \cdot \cos 45^\circ + 12700.206 = 17979.915 \text{ N}\end{aligned}$$

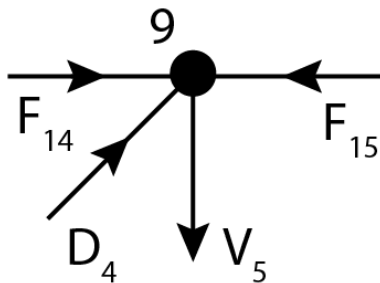
Сада је потребно извршити анализу сила у *Чвору 8*, при чему је шема сучељних сила приказана на слици 5.12.



**Слика 5.12.** Систем сучељних сила за чвор 8

$$\begin{aligned}\sum F_t &= 0; -D_4 \cdot \sin 45^\circ + V_4 - G = 0 \Rightarrow D_4 = \frac{V_4 - G}{\sin 45^\circ} \\ D_4 &= \frac{5279.71 - 703.961}{\sin 45^\circ} = 6471.09 \text{ N} \\ \sum F_a &= 0; -D_4 \cdot \cos 45^\circ - F_3 + F_4 = 0 \\ F_4 &= D_4 \cdot \cos 45^\circ + F_3 \\ F_4 &= 6471.09 \cdot \cos 45^\circ + 17979.915 = 22555.666 \text{ N}\end{aligned}$$

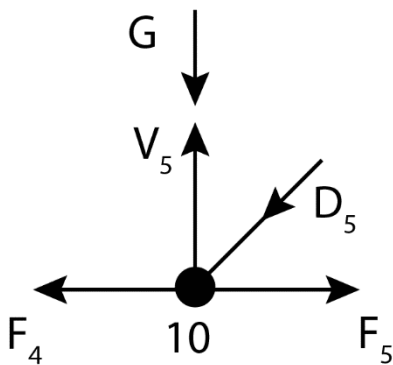
Сада је потребно извршити анализу сила у *Чвору 9*, при чему је шема сучељних сила приказана на слици 5.13.



**Слика 5.13.** Систем сучељних сила за чвор 9

$$\begin{aligned}\sum F_t &= 0; D_4 \cdot \sin 45^\circ - V_5 = 0 \\ V_5 &= D_4 \cdot \sin 45^\circ \\ V_5 &= 6471.09 \cdot \sin 45^\circ = 4575.751 \text{ N} \\ \sum F_a &= 0; D_4 \cdot \cos 45^\circ + F_{14} - F_{15} = 0 \\ F_{15} &= D_4 \cdot \cos 45^\circ + F_{14} \\ F_{15} &= 6471.09 \cdot \cos 45^\circ + 17979.915 = 22555.666 \text{ N}\end{aligned}$$

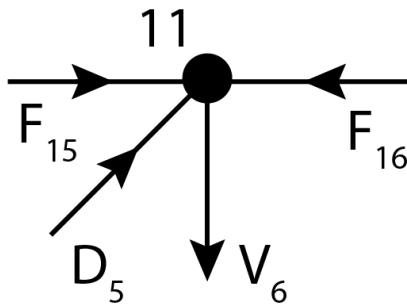
Сада је потребно извршити анализу сила у *Чвору 10*, при чему је шема сучељних сила приказана на слици 5.14.



**Слика 5.14.** Систем сучељних сила за чвор 10

$$\begin{aligned}\sum F_t &= 0; -D_5 \cdot \sin 45^\circ + V_5 - G = 0 \Rightarrow D_5 = \frac{V_5 - G}{\sin 45^\circ} \\ D_5 &= \frac{4575.751 - 703.961}{\sin 45^\circ} = 5457.537 \text{ N} \\ \sum F_a &= 0; -D_5 \cdot \cos 45^\circ - F_4 + F_5 = 0 \\ F_5 &= D_5 \cdot \cos 45^\circ + F_4 \\ F_5 &= 5457.537 \cdot \cos 45^\circ + 22555.666 = 26414.727 \text{ N}\end{aligned}$$

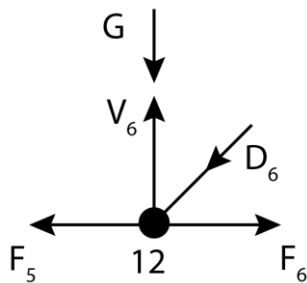
Сада је потребно извршити анализу сила у *Чвору 11*, при чему је шема сучељних сила приказана на слици 5.15.



**Слика 5.15.** Систем сучељних сила за чвор 11

$$\begin{aligned}\sum F_t &= 0; D_5 \cdot \sin 45^\circ - V_5 = 0 \\ V_6 &= D_5 \cdot \sin 45^\circ \\ V_6 &= 5457.537 \cdot \sin 45^\circ = 3859.061 \text{ N} \\ \sum F_a &= 0; D_5 \cdot \cos 45^\circ + F_{15} - F_{16} = 0 \\ F_{16} &= D_5 \cdot \cos 45^\circ + F_{15} \\ F_{16} &= 5457.537 \cdot \cos 45^\circ + 22555.666 = 26414.727 \text{ N}\end{aligned}$$

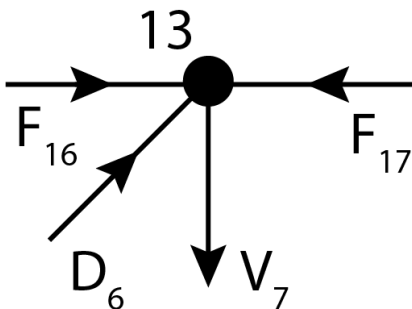
Сада је потребно извршити анализу сила у *Чвору 12*, при чему је шема сучељних сила приказана на слици 5.16.



**Слика 5.16.** Систем сучељних сила за чвор 12

$$\begin{aligned}\sum F_t &= 0; -D_6 \cdot \sin 45^\circ + V_6 - G = 0 \Rightarrow D_6 = \frac{V_6 - G}{\sin 45^\circ} \\ D_6 &= \frac{3859.061 - 703.961}{\sin 45^\circ} = 4461.985 \text{ N} \\ \sum F_a &= 0; -D_6 \cdot \cos 45^\circ - F_5 + F_6 = 0 \\ F_6 &= D_6 \cdot \cos 45^\circ + F_5 \\ F_6 &= 4461.985 \cdot \cos 45^\circ + 26414.727 = 29569.826 \text{ N}\end{aligned}$$

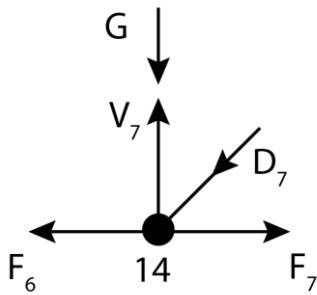
Сада је потребно извршити анализу сила у *Чвору 13*, при чему је шема сучељних сила приказана на слици 5.17.



**Слика 5.17.** Систем сучељних сила за чвор 13

$$\begin{aligned}\sum F_t &= 0; D_6 \cdot \sin 45^\circ - V_7 = 0 \\ V_7 &= D_6 \cdot \sin 45^\circ \\ V_7 &= 4461.985 \cdot \sin 45^\circ = 3155.1 \text{ N} \\ \sum F_a &= 0; D_6 \cdot \cos 45^\circ + F_{16} - F_{17} = 0 \\ F_{17} &= D_6 \cdot \cos 45^\circ + F_{16} \\ F_{17} &= 4461.985 \cdot \cos 45^\circ + 26414.727 = 29569.826 \text{ N}\end{aligned}$$

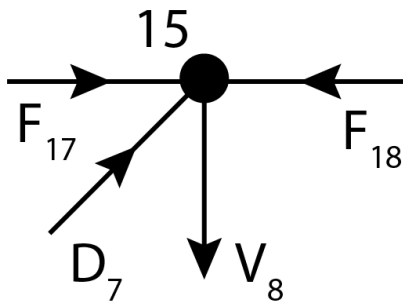
Сада је потребно извршити анализу сила у *Чвору 14*, при чему је шема сучељних сила приказана на слици 5.18.



Слика 5.18. Систем сучељних сила за чвор 14

$$\begin{aligned}\sum F_t &= 0; -D_7 \cdot \sin 45^\circ + V_7 - G = 0 \Rightarrow D_7 = \frac{V_7 - G}{\sin 45^\circ} \\ D_7 &= \frac{3155.1 - 703.961}{\sin 45^\circ} = 3466.434 \text{ N} \\ \sum F_a &= 0; -D_7 \cdot \cos 45^\circ - F_6 + F_7 = 0 \\ F_7 &= D_7 \cdot \cos 45^\circ + F_6 \\ F_7 &= 3466.434 \cdot \cos 45^\circ + 29569.826 = 32020.964 \text{ N}\end{aligned}$$

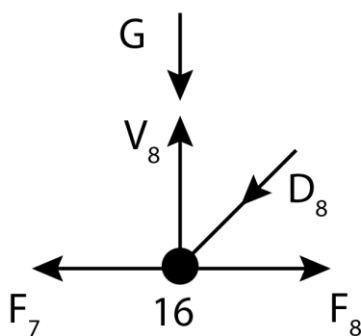
Сада је потребно извршити анализу сила у *Чвору 15*, при чему је шема сучељних сила приказана на слици 5.19.



Слика 5.19. Систем сучељних сила за чвор 15

$$\begin{aligned}\sum F_t &= 0; D_7 \cdot \sin 45^\circ - V_8 = 0 \\ V_8 &= D_7 \cdot \sin 45^\circ \\ V_8 &= 3466.434 \cdot \sin 45^\circ = 2451.14 \text{ N} \\ \sum F_a &= 0; D_7 \cdot \cos 45^\circ + F_{17} - F_{18} = 0 \\ F_{18} &= D_7 \cdot \cos 45^\circ + F_{17} \\ F_{18} &= 3466.434 \cdot \cos 45^\circ + 29569.826 = 32020.964 \text{ N}\end{aligned}$$

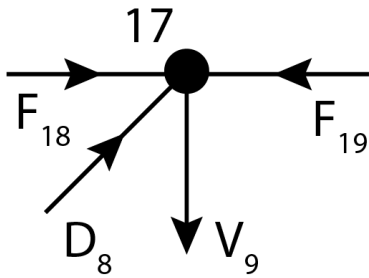
Сада је потребно извршити анализу сила у *Чвору 16*, при чему је шема сучељних сила приказана на слици 5.20.



Слика 5.20. Систем сучељних сила за чвор 16

$$\begin{aligned}\sum F_t &= 0; -D_8 \cdot \sin 45^\circ + V_8 - G = 0 \Rightarrow D_8 = \frac{V_8 - G}{\sin 45^\circ} \\ D_8 &= \frac{2451.14 - 703.961}{\sin 45^\circ} = 2470.884 \text{ N} \\ \sum F_a &= 0; -D_8 \cdot \cos 45^\circ - F_7 + F_8 = 0 \\ F_8 &= D_8 \cdot \cos 45^\circ + F_7 \\ F_8 &= 2470.884 \cdot \cos 45^\circ + 32020.964 = 33768.142 \text{ N}\end{aligned}$$

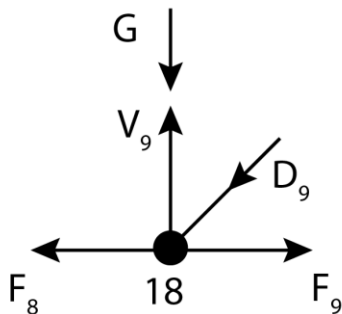
Сада је потребно извршити анализу сила у *Чвору 17*, при чему је шема сучељних сила приказана на слици 5.21.



Слика 5.21. Систем сучељних сила за чвор 17

$$\begin{aligned}\sum F_t &= 0; D_8 \cdot \sin 45^\circ - V_9 = 0 \\ V_9 &= D_8 \cdot \sin 45^\circ \\ V_9 &= 2470.884 \cdot \sin 45^\circ = 1747.178 \text{ N} \\ \sum F_a &= 0; D_8 \cdot \cos 45^\circ + F_{18} - F_{19} = 0 \\ F_{18} &= D_8 \cdot \cos 45^\circ + F_{19} \\ F_{19} &= 2470.884 \cdot \cos 45^\circ + 32020.964 = 33768.142 \text{ N}\end{aligned}$$

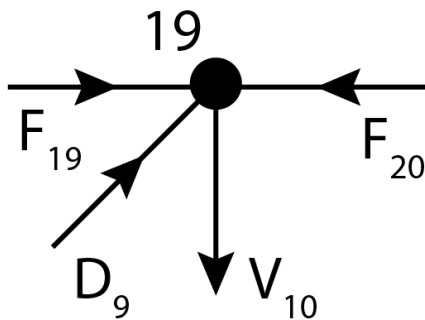
Сада је потребно извршити анализу сила у *Чвору 18*, при чему је шема сучељних сила приказана на слици 5.22.



Слика 5.22. Систем сучељних сила за чвор 18

$$\begin{aligned}\sum F_t &= 0; -D_9 \cdot \sin 45^\circ + V_9 - G = 0 \Rightarrow D_9 = \frac{V_9 - G}{\sin 45^\circ} \\ D_9 &= \frac{1747.178 - 703.961}{\sin 45^\circ} = 1475.331 \text{ N} \\ \sum F_a &= 0; -D_9 \cdot \cos 45^\circ - F_8 + F_9 = 0 \\ F_9 &= D_9 \cdot \cos 45^\circ + F_8 \\ F_9 &= 1475.331 \cdot \cos 45^\circ + 33768.142 = 34811.358 \text{ N}\end{aligned}$$

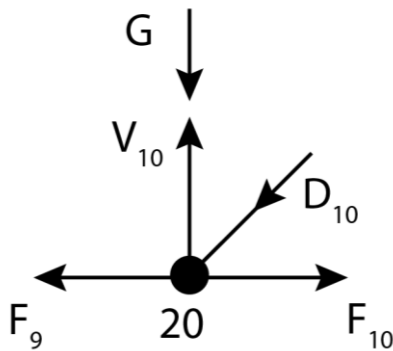
Сада је потребно извршити анализу сила у *Чвору 19*, при чему је шема сучељних сила приказана на слици 5.23.



Слика 5.23. Систем сучељних сила за чвор 19

$$\begin{aligned}\sum F_t &= 0; D_9 \cdot \sin 45^\circ - V_{10} = 0 \\ V_{10} &= D_9 \cdot \sin 45^\circ \\ V_{10} &= 1475.331 \cdot \sin 45^\circ = 1043.216 \text{ N} \\ \sum F_a &= 0; D_9 \cdot \cos 45^\circ + F_{19} - F_{20} = 0 \\ F_{20} &= D_9 \cdot \cos 45^\circ + F_{19} \\ F_{19} &= 1475.331 \cdot \cos 45^\circ + 33768.142 = 34811.358 \text{ N}\end{aligned}$$

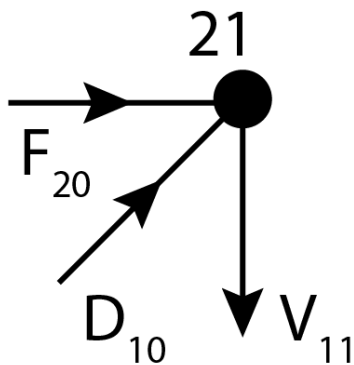
Сада је потребно извршити анализу сила у *Чвору 20*, при чему је шема сучељних сила приказана на слици 5.24.



Слика 5.24. Систем сучељних сила за чвор 20

$$\begin{aligned}\sum F_t &= 0; -D_{10} \cdot \sin 45^\circ + V_{10} - G = 0 \Rightarrow D_{10} = \frac{V_{10} - G}{\sin 45^\circ} \\ D_{10} &= \frac{1043.216 - 703.961}{\sin 45^\circ} = 479.779 \text{ N} \\ \sum F_a &= 0; -D_8 \cdot \cos 45^\circ - F_8 + F_9 = 0 \\ F_{10} &= D_{10} \cdot \cos 45^\circ + F_9 \\ F_{10} &= 479.779 \cdot \cos 45^\circ + 34811.358 = 35150.612 \text{ N}\end{aligned}$$

Сада је потребно извршити анализу сила у *Чвору 21*, при чему је шема сучељних сила приказана на слици 5.25.



Слика 5.25. Систем сучељних сила за чвор 21

$$\begin{aligned}\sum F_t &= 0; D_{10} \cdot \sin 45^\circ - V_{11} = 0 \\ V_{11} &= D_{10} \cdot \sin 45^\circ \\ V_{11} &= 479.779 \cdot \sin 45^\circ = 339.254 \text{ N}\end{aligned}$$

Узевши у обзир да је штап  $V_{11}$  заједнички за обе симетричне решетке, вредност ове силе је дупло већа у односу на горе израчунату вредност, па стога сила  $V_{11}$  износи:

$$V_{11} = 339.254 \cdot 2 = 678.508 \text{ N}$$

Све вредности претходно израчунатих сила у штаповима решетке су приказане у табели 5.3., док је у табели 5.4. представљен тип напрезања претходно анализираних штапова. У Додатку шематски су приказана напрезања свих штапова у хоризонталном делу анализиране решеткасте конструкције.

**Табела 5.3.** Силе у штаповима анализиране решетке

| Pojas                          | Dijagonalna ispuna           | Vertikalna ispuna             |
|--------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| $F_1 = 6716.537 \text{ N}$     | $D_1 = 9498.618 \text{ N}$   | $V_1 = 0 \text{ N}$           |
| $F_2 = 12700.206 \text{ N}$    | $D_2 = 8462.187 \text{ N}$   | $V_2 = 6716.537 \text{ N}$    |
| $F_3 = 17979.915 \text{ N}$    | $D_3 = 7466.636 \text{ N}$   | $V_3 = 5983.67 \text{ N}$     |
| $F_4 = 22555.666 \text{ N}$    | $D_4 = 6471.09 \text{ N}$    | $V_4 = 5279.71 \text{ N}$     |
| $F_5 = 26414.727 \text{ N}$    | $D_5 = 5457.537 \text{ N}$   | $V_5 = 4575.751 \text{ N}$    |
| $F_6 = 29569.826 \text{ N}$    | $D_6 = 4461.985 \text{ N}$   | $V_6 = 3859.061 \text{ N}$    |
| $F_7 = 32020.964 \text{ N}$    | $D_7 = 3466.434 \text{ N}$   | $V_7 = 3155.1 \text{ N}$      |
| $F_8 = 33768.142 \text{ N}$    | $D_8 = 2470.884 \text{ N}$   | $V_8 = 2451.14 \text{ N}$     |
| $F_9 = 34811.358 \text{ N}$    | $D_9 = 1475.331 \text{ N}$   | $V_9 = 1747.178 \text{ N}$    |
| $F_{10} = 35150.612 \text{ N}$ | $D_{10} = 479.779 \text{ N}$ | $V_{10} = 1043.216 \text{ N}$ |
| $F_{11} = 0 \text{ N}$         | /                            | $V_{11} = 678.508 \text{ N}$  |
| $F_{12} = 6716.537 \text{ N}$  | /                            | /                             |
| $F_{13} = 12700.206 \text{ N}$ | /                            | /                             |
| $F_{14} = 17979.915 \text{ N}$ | /                            | /                             |
| $F_{15} = 22555.666 \text{ N}$ | /                            | /                             |
| $F_{16} = 26414.727 \text{ N}$ | /                            | /                             |
| $F_{17} = 29569.826 \text{ N}$ | /                            | /                             |
| $F_{18} = 32020.964 \text{ N}$ | /                            | /                             |
| $F_{19} = 33768.142 \text{ N}$ | /                            | /                             |
| $F_{20} = 34818.358 \text{ N}$ | /                            | /                             |

**Табела 5.4.** Напрезања анализиране решетке

| Pojas                | Dijagonalna ispuna  | Vertikalna ispuna    |
|----------------------|---------------------|----------------------|
| $F_1$ – zatezanje    | $D_1$ – pritisak    | $V_1$ – /            |
| $F_2$ – zatezanje    | $D_2$ – pritisak    | $V_2$ – zatezanje    |
| $F_3$ – zatezanje    | $D_3$ – pritisak    | $V_3$ – zatezanje    |
| $F_4$ – zatezanje    | $D_4$ – pritisak    | $V_4$ – zatezanje    |
| $F_5$ – zatezanje    | $D_5$ – pritisak    | $V_5$ – zatezanje    |
| $F_6$ – zatezanje    | $D_6$ – pritisak    | $V_6$ – zatezanje    |
| $F_7$ – zatezanje    | $D_7$ – pritisak    | $V_7$ – zatezanje    |
| $F_8$ – zatezanje    | $D_8$ – pritisak    | $V_8$ – zatezanje    |
| $F_9$ – zatezanje    | $D_9$ – pritisak    | $V_9$ – zatezanje    |
| $F_{10}$ – zatezanje | $D_{10}$ – pritisak | $V_{10}$ – zatezanje |
| $F_{11}$ – /         | /                   | /                    |
| $F_{12}$ – pritisak  | /                   | /                    |
| $F_{13}$ – pritisak  | /                   | /                    |
| $F_{14}$ – pritisak  | /                   | /                    |
| $F_{15}$ – pritisak  | /                   | /                    |
| $F_{16}$ – pritisak  | /                   | /                    |
| $F_{17}$ – pritisak  | /                   | /                    |
| $F_{18}$ – pritisak  | /                   | /                    |
| $F_{19}$ – pritisak  | /                   | /                    |
| $F_{20}$ – pritisak  | /                   | /                    |

### 5.2.3. Димензионисање штапова

У овом поглављу је извршено димензионисање свих штапова у анализираној решетки конструкцији. Најоптерећенији је *Појас 5* чија аксијална сила износи  $F_{10} = 35150.612 \text{ N}$ . На

основу овог штапа се врши димензионисање на бази аксијалне силе. Овај прорачун је извршен коришћењем Еврокода 1993 1-1 [2] стр. 57.

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1.0; N_{Ed} = 35150.612 \text{ N}$$

где су:

$N_{Ed}$  – прорачунска вредност аксијалне (нормалне) силе,

$N_{t,Rd}$  – прорачунска вредност носивости на затезање.

$$N_{t,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

где су:

$A$  – површина попречног пресека,

$f_y$  – граница развлачења материјала,

$\gamma_{M0}$  – парцијални коефицијент за носивост попречног пресека било које класе.

Како би се успешно извршио овај прорачун потребно је одредити класу попречног пресека коришћењем Еврокода 1993 1-1 [2] стр. 49. и 50.

$$c_1 = 60 - 2 \cdot 3.2 = 53.6 \text{ mm}; t_1 = 3.2 \text{ mm}; \varepsilon = 1 \text{ za } f_y = 235 \text{ MPa}$$

$$\frac{c_1}{t_1} = \frac{53.6}{3.2} = 16.75 < 33 \cdot \varepsilon = 33$$

$$c_1 = 40 - 2 \cdot 3.2 = 33.6 \text{ mm}; t_1 = 3.2 \text{ mm}; \varepsilon = 1 \text{ za } f_y = 235 \text{ MPa}$$

$$\frac{c_1}{t_1} = \frac{33.6}{3.2} = 10.5 < 33 \cdot \varepsilon = 33$$

Анализирани профил 60x40x3.2 је прве класе, при чему је  $\gamma_{M0} = 1.1$ .

$$\frac{16577.01}{\frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}}} \leq 1.0 \Rightarrow A \geq \frac{35150.612}{\frac{f_y}{\gamma_{M0}}} = \frac{35150.612 \cdot 1.1}{235} = 164.535 \text{ mm}^2$$

На основу прорачуна може се закључити да претходно усвојен профил 60x40x3.2 задовољава захтевану површину попречног пресека. Са друге стране се може рећи да је анализирани профил предимензионисан, тако да се из економских разлога без проблема може усвојити слабији кутијаста профил 40x30x2, [6]. Овај профил се такође налази у понуди локалног добављача, [7].

Поред провере на аксијално напрезање, сада је потребно извршити проверу на извијање најоптерећенијег притиснутог појаса. Прорачун је извршен коришћењем Еврокода 1993 1-1 [2], стр. 66-68.

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1.0; N_{Ed} = 34818.358 \text{ N}$$

где је:

$N_{b,Rd}$  – прорачунска носивост притиснутог елемента на извијање.

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$$

где су:

$\chi$  – коефицијент редукције за одговарајућу криву извијања,

$\gamma_{M1}$  – парцијални коефицијент за носивост елемента услед његове нестабилности, за профиле прве класе овај коефицијент износи  $\gamma_{M1} = 1.1$ .

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 + \bar{\lambda}^2}}; \chi \leq 1.0$$

где су:

$\Phi$  – вредност за одређивање коефицијента редукције  $\chi$ ,

$\bar{\lambda}$  – релативна виткост.

$$\Phi = 0.5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2]$$

где је:

$\alpha$  – коефицијент имперфекције за одговарајућу криву извијања.

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}}$$

где је:

$N_{cr}$  – еластична критична сила за релевантан модел извијања која је заснована на бруто карактеристикама пресека, овај израз се не налази у Еврокодима већ је преузет из других литературних извора [9].

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{min}}{l_r^2}$$

где су:

$E$  – модул еластичности усвојеног материјала,

$I_{min}$  – минимална вредност момента инерције анализираног попречног пресека,

$l_r$  – редукована дужина штапа, овај израз се не налази у Еврокодима већ је преузет из других литературних извора, [8].

$$l_r = \beta \cdot l$$

где су:

$\beta$  – коефицијент извијања,

$l$  – дужина штапа.

Пошто се анализирани профил налази практично у средини конструкције усвојено је да штап зглобно ослоњен на оба ослонца, при чему коефицијент извијања  $\beta$  износи  $\beta = 1$ , [8].

Сада се може извршити прорачун на извијање профила 40x30x2, основне карактеристике профила преузете су из одговарајуће литературе [6]. Пре прорачуна извршено је и одређивање класе попречног пресека.

$$c_1 = 40 - 2 \cdot 2 = 36 \text{ mm}; t_1 = 2 \text{ mm}; \varepsilon = 1 \text{ za } f_y = 235 \text{ MPa}$$

$$\frac{c_1}{t_1} = \frac{36}{2} = 18 < 33 \cdot \varepsilon = 33$$

$$c_1 = 30 - 2 \cdot 2 = 26 \text{ mm}; t_1 = 2 \text{ mm}; \varepsilon = 1 \text{ za } f_y = 235 \text{ MPa}$$

$$\frac{c_1}{t_1} = \frac{26}{2} = 13 < 33 \cdot \varepsilon = 33$$

Попречни преске усвојеног профила је прве класе.

$$I_{min} = 3.51 \text{ cm}^4; A = 2.54 \text{ cm}^2; E = 2.1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned}
 l_r &= \beta \cdot l = 1 \cdot 0.75 = 0.75 \text{ m} \\
 N_{cr} &= \frac{\pi^2 \cdot 2.1 \cdot 10^5 \cdot 3.51 \cdot 10^4}{750^2} = 129331.296 \text{ N} \\
 \bar{\lambda} &= \sqrt{\frac{2.54 \cdot 10^2 \cdot 235}{129331.296}} = 0.6794 \\
 \phi &= 0.5 \cdot [1 + 0.49 \cdot (0.6794 - 0.2) + 0.6794^2] = 0.8482 \\
 \chi &= \frac{1}{0.8482 + \sqrt{0.8482^2 - 0.6794^2}} = 0.7375 \\
 N_{b,Rd} &= \frac{0.7375 \cdot 2.54 \cdot 10^2 \cdot 235}{1.1} = 40019.431 \text{ N} \\
 \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} &= \frac{34818.358}{40019.431} = 0.87 \leq 1,0
 \end{aligned}$$

На основу извршеног прорачуна закључено је да усвојен профил 40x30x2 задовољава проверу и на извијање и нааксијалну силу.

Сада је извршена проверу испуна, при чему је прво анализирана дијагонална испуна. На основу провере појаса може се закључити да је критичнија провера на извијање, тако да је прво извршена провера на извијање, па тек онда провера на основу аксијалне силе. За испуну је усвојен нешто „слабији“ кутијаста профил 30x20x2.5, који се такође налази у понуди локалног добављача, [6] [7]. Такође је усвојено да је штап зглобно ослоњен на оба ослонца. Пре прорачуна на извијање одређена је и класа попречног пресека.

$$\begin{aligned}
 c_1 &= 30 - 2.5 \cdot 2 = 25 \text{ mm}; t_1 = 2 \text{ mm}; \varepsilon = 1 \text{ za } f_y = 235 \text{ MPa} \\
 \frac{c_1}{t_1} &= \frac{26}{2} = 13 < 33 \cdot \varepsilon = 33 \\
 c_1 &= 20 - 2 \cdot 2 = 16 \text{ mm}; t_1 = 2 \text{ mm}; \varepsilon = 1 \text{ za } f_y = 235 \text{ MPa} \\
 \frac{c_1}{t_1} &= \frac{16}{2} = 8 < 33 \cdot \varepsilon = 33
 \end{aligned}$$

Попречни пресек усвојеног профила је прве класе.

$$\begin{aligned}
 \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} &\leq 1.0; N_{Ed} = 9498.618 \text{ N} \\
 I_{min} &= 1.15 \text{ cm}^4; A = 2.09 \text{ cm}^2; E = 2.1 \cdot 10^5 \text{ MPa} \\
 l_r &= \beta \cdot l = 1 \cdot 1.061 = 1.061 \text{ m} \\
 N_{cr} &= \frac{\pi^2 \cdot 2.1 \cdot 10^5 \cdot 1.15 \cdot 10^4}{1061^2} = 21173.18 \text{ N} \\
 \bar{\lambda} &= \sqrt{\frac{2.09 \cdot 10^2 \cdot 235}{21173.18}} = 1.523 \\
 \phi &= 0.5 \cdot [1 + 0.49 \cdot (1.523 - 0.2) + 1.523^2] = 1.983 \\
 \chi &= \frac{1}{1.983 + \sqrt{1.983^2 - 1.523^2}} = 0.307 \\
 N_{b,Rd} &= \frac{0.307 \cdot 2.09 \cdot 10^2 \cdot 235}{1.1} = 13707.55 \text{ N} \\
 \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} &= \frac{9498.618}{13707.55} = 0.692 \leq 1.0
 \end{aligned}$$

Пошто су штапови су претходно усвојени профили „прошли“ све релевантне провере, у табели 5.5. приказане су њихове основне карактеристике, [6]:

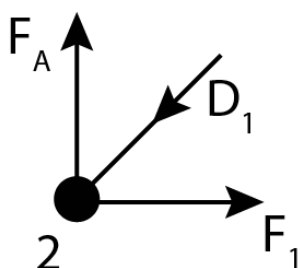
Табела 5.5. Основне карактеристике усвојених профила

|          | 30x20x2.5            | 40x30x2              |
|----------|----------------------|----------------------|
| $A$      | $209 \text{ mm}^2$   | $254 \text{ mm}^2$   |
| $I_y$    | $22100 \text{ mm}^4$ | $59400 \text{ mm}^4$ |
| $W_{pl}$ | $1920 \text{ mm}^3$  | $3370 \text{ mm}^3$  |

#### 5.2.4. Одређивање угиба решетке

Угиб ће се израчунати на основу методе виртуелног рада при чему је поступак прорачуна преузет из одговарајућег литературног извора, [9]. Угиб је анализиран у централном доњем чвору равanske решетке, овај чвор је илустративно приказан у Додатку. У овом чвору је постављено јединично оптерећење од 1 kN на основу којег је одређено оптерећење у штаповима.

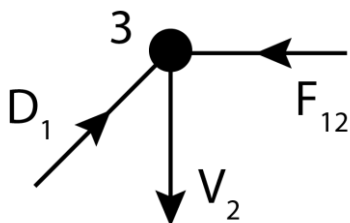
Пошто се оптерећење налази у средини решетке, отпори ослонаца су међусобно једнаки и они износе  $F_A = F_B = 0.5 \text{ kN}$ . Сада је потребно извршити анализу сила у Чвору 2, чија је шема сучељних сила приказана на слици 5.26.



$$\begin{aligned}\sum F_t &= 0; -D_1 \cdot \sin 45^\circ + F_A = 0 \Rightarrow D_1 = \frac{F_A}{\sin 45^\circ} \\ D_1 &= \frac{500}{\sin 45^\circ} = 707.107 \text{ N} \\ \sum F_a &= 0; -D_1 \cdot \cos 45^\circ + F_1 = 0 \\ -D_1 \cdot \cos 45^\circ &= -F_1 \Rightarrow F_1 = D_1 \cdot \cos 45^\circ \\ F_1 &= 707.107 \cdot \cos 45^\circ = 500 \text{ N}\end{aligned}$$

Слика 5.26. Систем сучељних сила за чвор 2

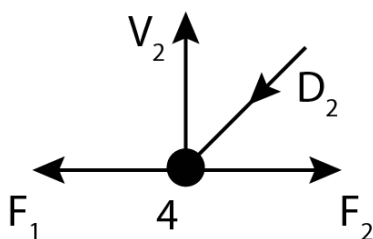
Сада је потребно извршити анализу сила у Чвору 3, при чему је шема сучељних сила приказана на слици 5.27.



$$\begin{aligned}\sum F_t &= 0; D_1 \cdot \sin 45^\circ - V_2 = 0 \Rightarrow V_2 = D_1 \cdot \sin 45^\circ \\ V_2 &= 707.107 \cdot \sin 45^\circ = 500 \text{ N} \\ \sum F_a &= 0; D_1 \cdot \cos 45^\circ - F_{12} = 0 \\ F_{12} &= D_1 \cdot \cos 45^\circ \\ F_{12} &= 707.107 \cdot \cos 45^\circ = 500 \text{ N}\end{aligned}$$

Слика 5.27. Систем сучељних сила за чвор 3

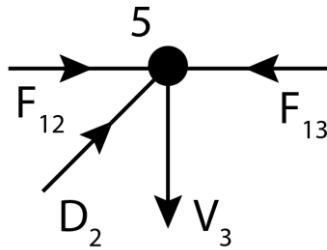
Сада је потребно извршити анализу сила у Чвору 4, при чему је шема сучељних сила приказана на слици 5.28.



$$\begin{aligned}\sum F_t &= 0; -D_2 \cdot \sin 45^\circ + V_2 = 0 \Rightarrow D_2 = \frac{V_2}{\sin 45^\circ} \\ D_2 &= \frac{500}{\sin 45^\circ} = 707.107 \text{ N} \\ \sum F_a &= 0; -D_2 \cdot \cos 45^\circ - F_1 + F_2 = 0 \\ F_2 &= D_2 \cdot \cos 45^\circ + F_1 \\ F_2 &= 707.107 \cdot \cos 45^\circ + 500 = 1000 \text{ N}\end{aligned}$$

Слика 5.28. Систем сучељних сила за чвор 4

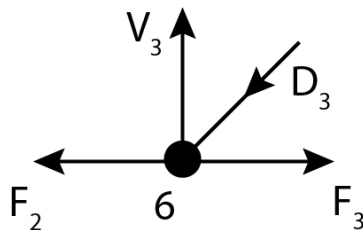
Сада је потребно извршити анализу сила у *Чвору 5*, при чему је шема сучељних сила приказана на слици 5.29.



Слика 5.29. Систем сучељних сила за чвор 5

$$\begin{aligned}\sum F_t &= 0; D_2 \cdot \sin 45^\circ - V_3 = 0 \\ V_3 &= D_2 \cdot \sin 45^\circ \\ V_3 &= 707.107 \cdot \sin 45^\circ = 500 \text{ N} \\ \sum F_a &= 0; D_2 \cdot \cos 45^\circ + F_{12} - F_{13} = 0 \\ F_{13} &= D_2 \cdot \cos 45^\circ + F_{12} \\ F_{13} &= 707.107 \cdot \cos 45^\circ + 500 = 1000 \text{ N}\end{aligned}$$

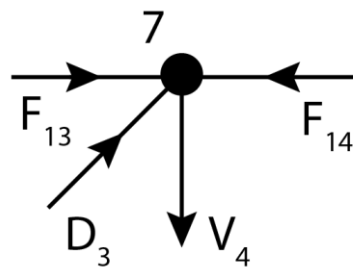
Сада је потребно извршити анализу сила у *Чвору 6*, при чему је шема сучељних сила приказана на слици 5.30.



Слика 5.30. Систем сучељних сила за чвор 6

$$\begin{aligned}\sum F_t &= 0; -D_3 \cdot \sin 45^\circ + V_3 = 0 \Rightarrow D_3 = \frac{V_3}{\sin 45^\circ} \\ D_3 &= \frac{500}{\sin 45^\circ} = 707.107 \text{ N} \\ \sum F_a &= 0; -D_3 \cdot \cos 45^\circ - F_2 + F_3 = 0 \\ F_3 &= D_3 \cdot \cos 45^\circ + F_2 \\ F_3 &= 707.107 \cdot \cos 45^\circ + 1000 = 1500 \text{ N}\end{aligned}$$

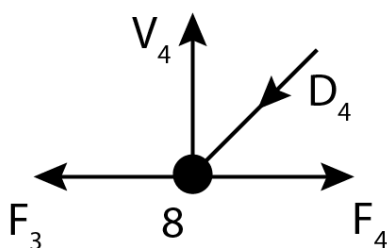
Сада је потребно извршити анализу сила у *Чвору 7*, при чему је шема сучељних сила приказана на слици 5.31.



Слика 5.31. Систем сучељних сила за чвор 7

$$\begin{aligned}\sum F_t &= 0; D_3 \cdot \sin 45^\circ - V_4 = 0 \\ V_4 &= D_3 \cdot \sin 45^\circ \\ V_4 &= 707.107 \cdot \sin 45^\circ = 500 \text{ N} \\ \sum F_a &= 0; D_3 \cdot \cos 45^\circ + F_{14} - F_{15} = 0 \\ F_{15} &= D_3 \cdot \cos 45^\circ + F_{14} \\ F_{15} &= 707.107 \cdot \cos 45^\circ + 1000 = 1500 \text{ N}\end{aligned}$$

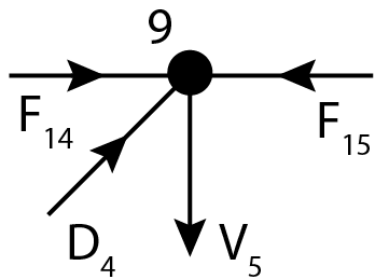
Сада је потребно извршити анализу сила у *Чвору 8*, при чему је шема сучељних сила приказана на слици 5.32.



Слика 5.32. Систем сучељних сила за чвор 8

$$\begin{aligned}\sum F_t &= 0; -D_4 \cdot \sin 45^\circ + V_4 = 0 \Rightarrow D_4 = \frac{V_4}{\sin 45^\circ} \\ D_4 &= \frac{500}{\sin 45^\circ} = 707.107 \text{ N} \\ \sum F_a &= 0; -D_4 \cdot \cos 45^\circ - F_3 + F_4 = 0 \\ F_4 &= D_4 \cdot \cos 45^\circ + F_3 \\ F_4 &= 707.107 \cdot \cos 45^\circ + 1500 = 2000 \text{ N}\end{aligned}$$

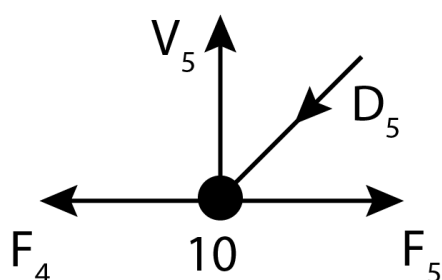
Сада је потребно извршити анализу сила у *Чвору 9*, при чему је шема сучељних сила приказана на слици 5.33.



Слика 5.33. Систем сучељних сила за чвор 9

$$\begin{aligned}\sum F_t &= 0; D_4 \cdot \sin 45^\circ - V_5 = 0 \\ V_5 &= D_4 \cdot \sin 45^\circ \\ V_5 &= 707.107 \cdot \sin 45^\circ = 500 \text{ N} \\ \sum F_a &= 0; D_4 \cdot \cos 45^\circ + F_{14} - F_{15} = 0 \\ F_{14} &= D_4 \cdot \cos 45^\circ + F_{13} \\ F_{15} &= 707.107 \cdot \cos 45^\circ + 1500 = 2000 \text{ N}\end{aligned}$$

Сада је потребно извршити анализу сила у *Чвору 10*, при чему је шема сучељних сила приказана на слици 5.34.

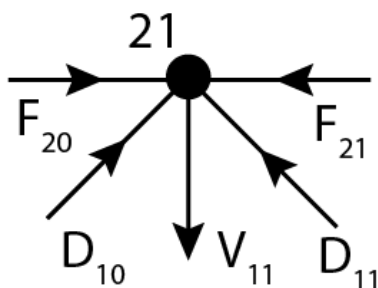


Слика 5.34. Систем сучељних сила за чвор 10

$$\begin{aligned}\sum F_t &= 0; -D_5 \cdot \sin 45^\circ + V_5 = 0 \Rightarrow D_5 = \frac{V_5}{\sin 45^\circ} \\ D_5 &= \frac{500}{\sin 45^\circ} = 707.107 \text{ N} \\ \sum F_a &= 0; -D_5 \cdot \cos 45^\circ - F_4 + F_5 = 0 \\ F_5 &= D_5 \cdot \cos 45^\circ + F_4 \\ F_5 &= 707.107 \cdot \cos 45^\circ + 2000 = 2500 \text{ N}\end{aligned}$$

На основу извршеног прорачуна може се закључити да су силе у дијагоналним и вертикалним испунама исте у целокупној конструкцији, а да само долази до повећања силе у појасевима. На основу овог опажања није потребно извршити потпуно детаљан прорачун силе у сваком штапу. У даљем току ће се анализирати *Чвор 21* и *Чвор 22*, као чворови на средини анализираних решеткастих конструкција.

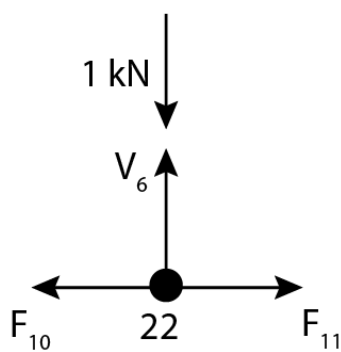
Сада је потребно извршити анализу сила у *Чвору 21*, при чему је шема сучељних сила приказана на слици 5.35.



Слика 5.35. Систем сучељних сила за чвор 21

$$\begin{aligned}\sum F_t &= 0; D_5 \cdot \sin 45^\circ - V_6 + D_6 \cdot \sin 45^\circ = 0 \\ D_{10} &= D_{11} - \text{rešetka je simetrična} \\ V_{11} &= 2 \cdot D_{10} \cdot \sin 45^\circ \\ V_{11} &= 2 \cdot 707.107 \cdot \sin 45^\circ = 1000 \text{ N}\end{aligned}$$

Сада је потребно извршити анализу сила у *Чвору 22*, при чему је шема сучељних сила приказана на слици 5.36.



$$\sum F_t = 0; V_6 - 1 \text{ kN} = 0$$
$$V_6 = 1 \text{ kN}$$

**Слика 5.36.** Систем сучељних сила за чвор 22

У табели 5.6. приказане су вредности сила у свим штаповима анализиране решетке.

**Табела 5.6.** Силе у штаповима анализиране решетке

| Појас                     | Дијагонална испуна           | Вертикална испуна         |
|---------------------------|------------------------------|---------------------------|
| $F_1 = 500 \text{ N}$     | $D_1 = 707.107 \text{ N}$    | $V_1 = 0 \text{ N}$       |
| $F_2 = 1000 \text{ N}$    | $D_2 = 707.107 \text{ N}$    | $V_2 = 500 \text{ N}$     |
| $F_3 = 1500 \text{ N}$    | $D_3 = 707.107 \text{ N}$    | $V_3 = 500 \text{ N}$     |
| $F_4 = 2000 \text{ N}$    | $D_4 = 707.107 \text{ N}$    | $V_4 = 500 \text{ N}$     |
| $F_5 = 2500 \text{ N}$    | $D_5 = 707.107 \text{ N}$    | $V_5 = 500 \text{ N}$     |
| $F_6 = 3000 \text{ N}$    | $D_6 = 707.107 \text{ N}$    | $V_6 = 500 \text{ N}$     |
| $F_7 = 3500 \text{ N}$    | $D_7 = 707.107 \text{ N}$    | $V_7 = 500 \text{ N}$     |
| $F_8 = 4000 \text{ N}$    | $D_8 = 707.107 \text{ N}$    | $V_8 = 500 \text{ N}$     |
| $F_9 = 4500 \text{ N}$    | $D_9 = 707.107 \text{ N}$    | $V_9 = 500 \text{ N}$     |
| $F_{10} = 5000 \text{ N}$ | $D_{10} = 707.107 \text{ N}$ | $V_{10} = 500 \text{ N}$  |
| $F_{11} = 0 \text{ N}$    | /                            | $V_{11} = 1000 \text{ N}$ |
| $F_{12} = 500 \text{ N}$  | /                            | /                         |
| $F_{13} = 1000 \text{ N}$ | /                            | /                         |
| $F_{14} = 1500 \text{ N}$ | /                            | /                         |
| $F_{15} = 2000 \text{ N}$ | /                            | /                         |
| $F_{16} = 2500 \text{ N}$ | /                            | /                         |
| $F_{17} = 3000 \text{ N}$ | /                            | /                         |
| $F_{18} = 3500 \text{ N}$ | /                            | /                         |
| $F_{18} = 4000 \text{ N}$ | /                            | /                         |
| $F_{18} = 4500 \text{ N}$ | /                            | /                         |

На основу израчунатих вредности сила у штаповима решетке која је оптерећена јединичним оптерећењем од 1 kN може се извршити одређивање угиба решетке на основу обрасца, [9].

$$1 \text{ kN} \cdot \Delta_{cv} = \sum \frac{n \cdot N \cdot l}{A \cdot E}$$

где су:

1 kN – виртуелно дејство које делује на решеткасту конструкцију,

$\Delta_{cv}$  – угиб решеткасте конструкције на коју делују реална дејства,

$n$  – сила у штапу решетке која је оптерећена виртуалним дејством,

$N$  – сила у штапу решетке која је оптерећена реалним дејствима,

$l$  – дужина штапа.

Коришћењем софтвера *Microsoft Excel* израчунат је угиб решетке:

$$\Delta_{cv} = 39.103 + 1.367 + 0.683 = 41.153 \text{ mm}$$

Гранична вредност допуштеног угиба се може одредити на основу следећег обрасца, [10]:

$$\delta = \frac{l}{300} = \frac{15000}{300} = 50 \text{ mm}$$

Коначно се може закључити да је угиб конструкције знатно мањи од дозвољеног, односно, може се рећи да анализирана решетка задовољава услов угиба.

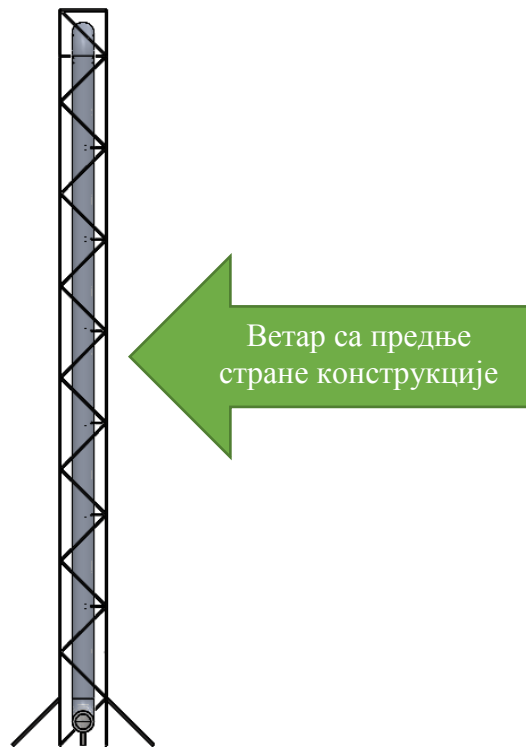
### 5.3. Анализа осталих параметара конструкције

У оквиру овог поглавља извршена је анализа осталих параметара конструкције и то дејства ветра, заварени спојеви, и прорачун бочних ужади.

#### 5.3.1. Одређивање силе ветра

##### 5.3.1.1. Сила ветра која делује на предњу страну конструкције

На основу усвојених димензија профила, сада се може одредити утицај силе ветра уколико ветар делује спреда на целокупну решеткасту конструкцију као што је приказано на слици 5.37. Целокупан прорачун извршен је коришћењем Еврокода 1991 1-4 стр. 25.–26., [5].



**Слика 5.37.** Ветар који делује на предњу страну конструкције  
Сила ветра се може одредити на основу следећег израза:

$$F_w = c_s \cdot c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref}$$

где су:

$c_s \cdot c_d$  – коефицијент конструкције (усвојена је вредност  $c_s \cdot c_d = 1.00$ ),

$c_f$  – коефицијент силе за конструкцију,

$q_p(z_e)$  – ударни притисак ветра,

$A_{ref}$  – референтна површина конструкције.

Коефицијент силе за конструкције се може израчунати на основу са стр. 72. [5].:

$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_\lambda$$

где су:

$c_{f,0}$  – коефицијент силе конструкцијских елемената без струјања ветра на слободном крају,

$\psi_\lambda$  – коефицијент утицаја ветра.

Коефицијент испуњености решетке се може израчунати на основу израза на стр. 74. [5]:

$$\varphi = \frac{A}{A_c}$$

где су:

$A$  – збир пројектованих површина свих елемената,

$A_c$  – површина оивичена контуром разматране површи.

Коефицијент испуњености решетке може се израчунати коришћењем израза 7.28. на стр. 77., [5]:

$$\begin{aligned} A_c &= 2 \cdot 11.25 \cdot 0.79 + 15 \cdot 0.79 = 29.625 \text{ m}^2 \\ A_{pojava} &= (2) \cdot 15 \cdot 40 \cdot 10^{-3} + (2) \cdot 12 \cdot 40 \cdot 10^{-3} + (2) \cdot 10.5 \cdot 40 \cdot 10^{-3} = 3 \text{ m}^2 \\ A_{ver.ispune} &= (2 \cdot 14) \cdot 0.75 \cdot 30 \cdot 10^{-3} + (19) \cdot 0.75 \cdot 30 \cdot 10^{-3} = 1.0575 \text{ m}^2 \\ A_{dij. ispune} &= (2 \cdot 15) \cdot 1.061 \cdot 30 \cdot 10^{-3} + (20) \cdot 1.061 \cdot 30 \cdot 10^{-3} = 1.5915 \text{ m}^2 \\ A &= A_{pojava} + A_{ver.ispune} + A_{dij. ispune} = 3 + 1.0575 + 1.5915 = 5.649 \text{ m}^2 \\ \varphi &= \frac{A}{A_c} = \frac{5.649}{29.625} = 0.191 \end{aligned}$$

Коефицијент конструкционих елемената износи  $c_{f,0}$  на основу слике 7.34. на стр. 73. [5] износи :

$$c_{f,0} = 2.85$$

Ефективна виткост  $\lambda$  може се одредити на основу табеле 7.16. на стр. 76. [5]. За анализирану решеткасту конструкцију усвојено је да овај коефицијент износи  $\lambda = 70$ .

Коефицијент утицаја ветра може се одредити на основу слике 7.36. на стр. 77. [5]. За анализирану решеткасту конструкцију усвојено је да овај коефицијент износи  $\psi_\lambda = 0.98$ .

Вредност коефицијента силе за конструкцију се коначно може израчунати:

$$c_f = 2.85 \cdot 0.98 = 2.793$$

Пошто су одређене вредности свих релевантних фактора, коначно се може одредити вредност силе ветра за решетку:

$$F_{w \text{ reš.}} = 1 \cdot 2.793 \cdot 2325.431 \cdot 5.802 = 37683.577 \text{ N}$$

Сада је потребно одредити утицај ветра на цев са изолацијом и додатном заштитном за цев. Целокупна дужина цеви износи:

$$L_{cevi} = 2 \cdot V + H + 4 \cdot R$$

где су:

$V$  – дужина вертикала без две крајње решеткасте секције,

$H$  – дужина хоризонтале без две крајње решеткасте секција,

$R$  – дужина заобљења на четири превоја

$$L_{cevi} = 2 \cdot 10500 + 13500 + 4 \cdot \frac{375 \cdot \pi}{2} = 36856.194 \text{ mm} = 36.856 \text{ m}$$

Ширина цеви  $B_{cevi}$  је усвојена на основну финалног решења као:

$$B_{cevi} = Cev \text{ sa vodom} + Izolacija + Zaštitna cev = 250 + 100 + 2 = 352 \text{ mm} = 0.352 \text{ m}$$

Сада се коначно може израчунати површина цеви на коју делује ветар:

$$A_{cevi} = L_{cevi} \cdot B_{cevi} = 36.856 \cdot 0.352 = 12.973 \text{ m}^2$$

При прорачуну силе ветра, у односу на решеткасту конструкцију разликује се фактор за конструкцију,  $c_f$  који се код цилиндара одређује на основу обрасца на стр. 68. ЕС1991 1-4 [5]:

$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_\lambda$$

Фактор  $c_{f,0}$  може се одредити на основу *Слике 7.28.* при чему је потребно одредити однос  $k/b$ :

Еквивалентна храпавост за ливено гвожђе износи  $k = 0.2$  (Табела 7.13.) стр. 69. ЕС 1991 1-4 [5], док ширина цеви износи 352 мм. Сада се може израчунати овај однос који износи:

$$\frac{k}{b} = \frac{0.2}{352} = 0.000568 = 5.68 \cdot 10^{-4}$$

На основу добијене вредности односа  $k/b$ , усваја се да фактор износи  $c_{f,0} = 0.62$ .

Ефективна виткост  $\lambda$  може се одредити на основу Табеле 7.16. на стр. 76. [5]. За анализиран цилиндар усвојено је да овај коефицијент износи  $\lambda = 70$ .

На основу испуњености конструкције  $\varphi = 1$  може се усвојити да фактор  $\psi_\lambda$  износи  $\psi_\lambda = 0.91$ .

Пошто су сви фактори познати, сада се може израчунати вредност фактора  $c_f$ :

$$c_f = 0.62 \cdot 0.91 = 0.5642$$

Сада се може израчунати вредност силе ветра за цев:

$$F_{w\text{ cevi}} = 1 \cdot 0.5642 \cdot 2325.431 \cdot 12.973 = 17020.682 \text{ N}$$

Укупна сила ветра износи:

$$F_{w\text{ ukupno}} = F_{w\text{ cevi}} + F_{w\text{ reš.}} = 37683.577 + 17020.682 = 54704.259 \text{ N}$$

Пошто са ове стране делује и додатна сила ветра која настаје када воз прође испод целокупне решеткасте конструкције, у даљем прорачуну ће се узети да укупна вредност силе ветра износи  $F_w = 60 \text{ kN}$ , при чему је ова вредност подељена на  $F_{w\text{ reš.}} = 40 \text{ kN}$  и  $F_{w\text{ cev.}} = 20 \text{ kN}$ .

Дејство ветра за решеткасту конструкцију је приказано за обе раванске решетке. Пошто ветар не дејствује истим интензитетом на обе раванске решетке, потребно је увести *shielding coefficient*  $\eta$  који говори колико је оптерећена друга решеткаста секција коју делимично штити од ветра прва решеткаста секција. Пошто метод одређивања овог коефицијента није присутан у Еврокоду, његово одређивање извршено је коришћењем другог литературног извора [11].

На основу усвојеног растојања између раванских секција од 0.75 м, може се израчунати  $a/b$  однос:

$$\frac{a}{b} = \frac{0.750}{0.750} = 1$$

На основу  $a/b = 1$ , и  $\varphi = 0.191$ , може се одредити, на основу табеле на стр. 166. [11], да *shielding coefficient*  $\eta$  износи  $\eta = 0.78$ , односно да ће 78% силе са прве раванске решеткасте конструкције дејствовати на другу раванску решеткасту конструкцију. Пошто цев онемогућава да се део ветра директно пренесе на другу решеткасту секцију, усвојена је нешто нижа вредност овог коефицијента  $\eta = 0.50$ , односно 50% силе са прве решеткасте секције ће дејствовати на другу решеткасту секцију. На основу овог податка може се одредити дејство ветра на прву и на другу раванску решеткасту конструкцију.

$$150 \cdot x = 40000 \text{ N} \Rightarrow x = 266.67 \text{ N}$$

$$F_{w1} = 100 \cdot 266.67 = 26666.67 \text{ N}$$

$$F_{w2} = 40000 - 26666.67 = 13333.33 \text{ N}$$

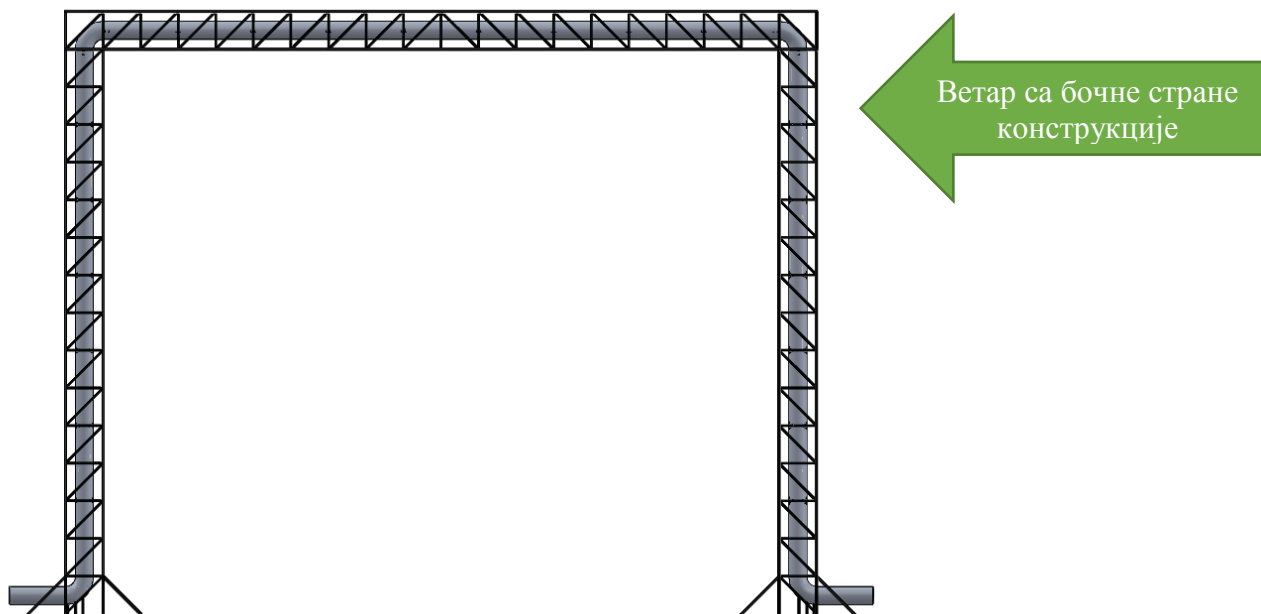
Укупан број чворова релевантних чворова по раванској решети износи 98. На основу добијених података може се одредити дејство силе ветра по чвору за обе раванске решетке, при чему је потребно напоменути да је сила ветра за цев подједнако расподељена на обе раванске решетке.

$$F_{w1 \text{ чвор}} = \frac{26666.67 + 10000}{98} = 374.149 \text{ N}$$

$$F_{w2 \text{ чвор}} = \frac{13333.33 + 10000}{98} = 238.095 \text{ N}$$

### 5.3.1.2. Бочна сила ветра

У оквиру овог поглавља анализиран је утицај бочне силе ветра на анализирану решеткасту конструкцију, као што је приказано на слици 5.38.



**Слика 5.38.** Утицај бочног ветра на конструкцију

Првобитно је одређен утицај ветра на бочни профил, коришћењем израза 7.9. стр. 62. [1.4]

$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_r \cdot \psi_\lambda$$

где су:

$c_{f,0}$  – збир пројектованих површина свих елемената,

$\psi_r$  – коефицијент редукције за квадратне пресеке са заобљењим угловима,

$\psi_\lambda$  – коефицијент утицаја краја за елементе са струјањем ветра на слободном крају.

Пошто је у питању појасни профил, његов однос  $d/b$  на основу *Слика 7.23.* стр. 63. [5] износи:

$$\frac{d}{b} = \frac{40}{30} = 1.333$$

$$c_{f,0} = 2.0$$

Заобљење на анализираном појасном профилу није тачно дефинисано, тако да је у оквиру овог прорачуна усвојена следећа вредност [7]:

$$r = 1.6 \cdot 3 = 4.8 \text{ mm}$$

$$\frac{r}{b} = \frac{4.8}{30} = 0.16$$

На основу претходно одређених података коначно се може усвојити вредност коефицијента редукције за квадратне пресеке са заобљењим угловима на основу *Слике 7.24.* стр. 63. [5].

$$\psi_r = 0.6$$

Како би се одредио коефицијент испуне потребно је одредити укупну површину контуре:

$$A_c = 12 \cdot 0.78 = 9.36 \text{ m}^2$$

Сада је потребно израчунати референту површину која се састоји од два појасна профила висине 12 м, као и неколико дијагоналних испуна. Гледано са бочне стране види се краћа страница

појасног профила дужине 30 мм, као и дужа страница профила испуне која је такође дужине 30 мм.

$$A_{ref\ poj.} = 2 \cdot l \cdot b = 2 \cdot 12 \cdot 30 \cdot 10^{-3} = 0.72 \text{ m}^2$$

$$A_{ref\ isp.} = 15 \cdot l \cdot b = 15 \cdot 0.75 \cdot \sqrt{2} \cdot 30 \cdot 10^{-3} = 0.477 \text{ m}^2$$

$$A_{ref} = A_{ref\ poj.} + A_{ref\ isp.} = 0.72 + 0.477 = 1.197 \text{ m}^2$$

Сада се може одредити вредност коефицијента испуњености решетке:

$$\varphi = \frac{A_{ref}}{A_c} = \frac{1.122}{9.36} = 0.119$$

Вредност ефективне виткости се усваја иста као и у претходном случају, и она износи  $\lambda = 70$ , док на основу испуњености решетке усваја се вредност коефицијента утицаја краја,  $\psi_\lambda = 0.985$ . На основу ових података може се одредити вредност фактора утицаја ветра на профил:

$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_\lambda \cdot \psi_r = 2 \cdot 0.985 \cdot 0.6 = 1.182$$

Коначно се може одредити сила ветра која делује на решеткасту конструкцију:

$$F_{w\ reš.} = 1 \cdot 1.182 \cdot 2325.431 \cdot 1.182 = 3248.915 \text{ N}$$

Сада је потребно одредити утицај бочног ветра на цев. Дужина ветра се може одредити као:

$$L_{cevi} = V + 2 \cdot R = 10500 + 2 \cdot \frac{375 \cdot \pi}{2} = 11678.097 = 11.678 \text{ m}$$

Сада се може одредити релевантна површина на коју делује бочни ветар:

$$A_{cevi} = 11.678 \cdot 0.352 = 4.11 \text{ m}^2$$

Сви потребни фактори потребни за прорачун силе ветра који делује на цев су усвојени из претходног поглавља, тако да укупна сила ветра која делује на цев износи:

$$F_{w\ cevi} = 1 \cdot 0.5642 \cdot 2325.431 \cdot 4.11 = 5392.35 \text{ N}$$

Укупна сила бочног ветра износи:

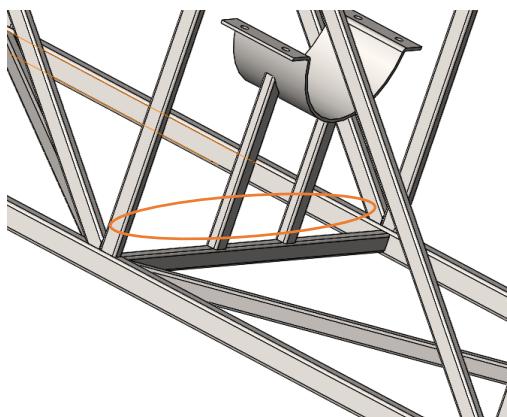
$$F_{w\ reš.} + F_{w\ cevi} = 3248.915 + 5392.35 = 8641.265 \text{ N}$$

Пошто је сила бочног ветра значајно мања од силе предњег ветра, овај случај не представља критичну прорачунску ситуацију, тако да даље није анализиран. Потребно је напоменути да се бочни и предњи ветар не могу појавити у исто време.

### 5.3.2. Прорачун штапова који спајају раванске решетке

У финалном извођењу решеткасте конструкције, на штапови који спајају раванске решетке се не налазе на свакој решеткастој секцији, већ на свакој другој (растојање 1.5 м), анализиран профил је приказан на слици 5.39. Због ове чињенице, оптерећење од две решеткасте секције се преноси на ове попречне штапове. За претходни прорачун усвајен је профил 30x20x2 mm, чија маса износи 1.64 kg/m [7]. За анализирану конструкцију тежина профила износи:

$$G_{profila} = 1.5 \cdot 1.64 \cdot 9.81 = 24.132 \text{ N}$$



Слика 5.39. Анализирани профил испуне

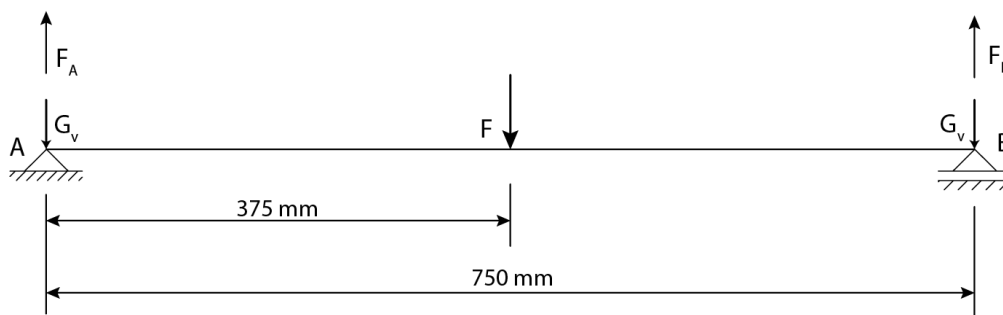
Затим је потребно израчунати утицај тежине цеви, воде као и самог профила који спаја две раванске решетке. Пошто један анализиран штап носи дејство цеви и воде за две решеткасте секције, може се закључити да је најоптерећенији штап онај који носи дејства  $G_2$  и  $G$ . При анализи овог штапа у обзир није узето дејство снега јер на овај део решеткасте конструкције неће имати значајнији утицај. При анализи овог штапа у обзир су узета дејства тежине цеви, воде и анализираниог профила,

$$F = G_{cev2} + G_{vode2} + G_{cev1} + G_{vode1} + G_{profila}$$

$$F = 289.682 + 427.839 + 225.364 + 332.854 + 24.132 = 1299.87 \text{ N}$$

Анализирани штап је приказан на слици 5.40. при чему поред претходно приказаних дејстава, у обзир су узете и тежине вертикалних испуна које делују у ослонцима. Тежина вертикалних ослонаца износи:

$$G_{v.ispune} = 0.75 \cdot 1.64 \cdot 9.81 = 12.066 \text{ N}$$



Слика 5.40. Шематски приказ анализираниог профила

$$M_A = 0 \Rightarrow G_{v.ispune} \cdot 0.75 + F \cdot \frac{0.75}{2} - F_A \cdot 0.75 = 0$$

$$12.066 \cdot 0.75 + 1299.87 \cdot \frac{0.75}{2} - F_A \cdot 0.75 = 0$$

$$F_A = \frac{12.066 \cdot 0.75 + 1299.87 \cdot \frac{0.75}{2}}{0.75} = 662.001 \text{ N}$$

Максимална вредност трансверзалне силе износи  $F_{trans.max} = 649.935 \text{ N}$ , док момент савијања који ова сила изазива (гледано од средине греде) износи:

$$M_A = 649.935 \cdot \frac{0.75}{2} = 243.725 \text{ Nm}$$

Сада се може извршити провера на смицање коришћењем Еврокода 1993 1-1 стр. 57., [2].

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1.0$$

$$V_{pl,Rd} = V_{c,Rd} = \frac{A_V \cdot (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}}$$

где је:

$A_V$  – површина смицања.

За анализирани попречни пресек, површина смицања се израчунава [10]:

$$A_V = \frac{A \cdot h}{b + h} = \frac{209 \cdot 30}{20 + 30} = 125.4 \text{ mm}^2$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{125.4 \cdot (235 / \sqrt{3})}{\frac{1.1}{649.935}} = 15467.213 \text{ N}$$

$$\frac{649.935}{15467.213} = 0.042 \leq 1$$

Провера задовољава. Сада је потребно проверити греду на утицај максималног момента савијања коришћењем образаца на стр. 57. и 58. ЕС 1993 1-1 [2]:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1.0$$

$$M_{pl,Rd} = V_{c,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1920 \cdot 235}{1.1} = 410181.81 \text{ Nmm} = 410.18 \text{ Nm}$$

$$\frac{243.725}{410.18} = 0.594 \leq 1.0$$

Провера задовољава. Сада је потребно израчунати максималну вредност угиба. Пошто сличан случај не постоји у табlici еластичних линија [8], усвојен је случај са концентрисаном силом у центру, па тако за овај случај максимални угиб износи, [8]:

$$f = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot I} = \frac{1299.87 \cdot 750^3}{48 \cdot 2.1 \cdot 10^5 \cdot 22100} = 2.46 \text{ mm}$$

Граничан угиб износи:

$$f = \frac{l}{300} = \frac{750}{300} = 2.5 \text{ mm}$$

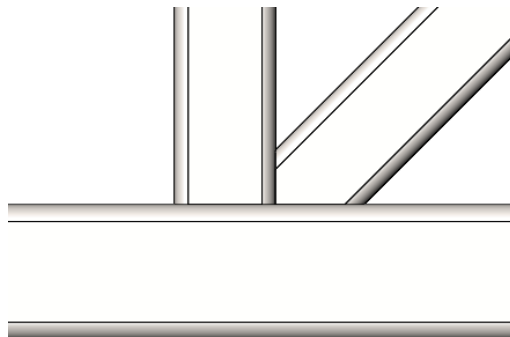
На основу добијених резултата може се рећи да је угиб мањи од критичног. На основу свих провера може се рећи да изабрани профил задовољава све потребне услове.

### 5.3.3. Прорачунавање заварених спојева

У оквиру овог поглавља извршен је прорачун завареног споја између појасних профила и испуна (вертикалних и дијагоналних). Овом приликом потребно је напоменути да је најоптерећенија дијагонална испуна оптерећена на затезање, док је најоптерећенија вертикална испуна оптерећена на притисак.

Графички се може уочити да долази до преклопања дијагоналних и вертикалних испуна као што је приказано на слици 5.41. Заварен спој који се користи за спајање предочених

профилапрофила испуне, се у литератури може наћи под ознаком КТ. Пошто се у Еврокодима не може пронаћи израз прорачунске носивости за КТ спојеве, прорачун је извршен на основу израза за Т везу, стр. 129. ЕС 1993 1-8 [12]. Коначно је извршена провера прорачунске носивостина основу обрасца за К и N везу са размаком. По одређивању прорачунске носивости, одређена је потребна дебљина завареног споја на основу слике 5.40. и израза 4.1. на стр. 45. и 46. ЕС 1993 1-8 [12]



**Слика 5.41.** Спој дијагоналне и вертикалне испуне са појасним профилем

Као материјал завареног споја усваја се челик S235, стр. 30. [12], и то првенствено услед чињенице да су сви профили израђени од челика S235. У даљем прорачуну ће се појавити корелациони фактор  $\beta_w$ , при чему његова вредност износи  $\beta_w = 0.80$ , стр. 30. [12].

#### 5.3.3.1. Веза дијагоналне испуне са појасним профилем

Првенствено је извршена провера прорачунске носивости завареног споја за Т шавове, а затим и за К и N шавове са размаком.

Првенствено је потребно задовољити услов:

$$N_{Ed} \leq N_{i,Rd}$$

где су:

$N_{Ed}$  – прорачунска вредност аксијалне силе у елементу,

$N_{i,Rd}$  – прорачунска вредност носивости везе на дејство аксијалне силе за елемент.

Прорачунска вредности аксијалних сила у елементима испуне су претходно одређене, при чему су за прорачун меродавне критичне вредности  $D1=9498.618\text{ N}$  и  $V2=6716.537\text{ N}$ . Сада је потребно одредити прорачунску вредност.

$$N_{i,Rd} = \frac{k_n \cdot f_{y0} \cdot t_0^2}{(1 - \beta) \cdot \sin \theta_1} \cdot \left( \frac{2 \cdot \beta}{\sin \theta_1} + 4 \cdot (1 - \beta)^{0.5} \right) / \gamma_{M5}$$

где су:

$k_n$  – фактор који зависи да ли је профил напрегнут на притисак или на затезање,

$f_{y0}$  – граница развлачења појасног елемента,

$\theta_1$  – угао између елемената испуне  $i$  и појаса,

$\beta$  – однос ширине елемента испуне и појасног елемента,

$\gamma_{M5}$  – носивост веза код решеткастих носача од шупљих профила (стр. 19. [12]).

$$\beta = \frac{b_1}{b_0} = \frac{20}{30} = 0.667$$

Усвојено је да фактор  $k_n$  износи,  $k_n = 1.0$ .

За усвојени појасни профил граница развлачења износи,  $f_{y0} = 235\text{ MPa}$

Вредност парцијалног степена сигурности износи  $\gamma_{M5} = 1.0$ .

За дијагонални профил испуне, угао износи  $\theta_i = 45^\circ$ .

$$N_{i,Rd} = \frac{1 \cdot 235 \cdot 2^2}{(1 - 0.667) \cdot \sin 45^\circ} \cdot \left( \frac{2 \cdot 0.667}{\sin 45^\circ} + 4 \cdot (1 - 0.667)^{0.5} \right) / 1$$

$$N_{i,Rd} = 16745.981 \text{ N}$$

$$N_{i,Ed} \leq N_{i,Rd}; \quad 9498.618 \text{ N} < 16745.981 \text{ N}$$

Сада је извршена провера добијених резултата на основу израза за прорачун К и N шавова са размаком.

$$N_{i,Rd} = \frac{8.9 \cdot \gamma^{0.5} \cdot k_n \cdot f_{y0} \cdot t_0^2}{\sin \theta_i} \cdot \left( \frac{b_1 + b_2}{2 \cdot b_0} \right) / \gamma_{M5}$$

где су:

$\gamma$  – однос ширине или пречника појаса и двоструке дебљине зида његовог попречног пресека,

$k_n$  – фактор који зависи да ли је профил напрегнут на притисак или на затезање,

$f_{y0}$  – граница развлачења појасног елемента,

$\theta_i$  – угао између елемената испуне  $i$  и појаса

$b_1, b_2, b_0$  – димензије одговарајућих профила.

$\gamma_{M5}$  – носивост веза код решеткастих носача од шупљих профила (стр. 19.)

$$\gamma = \frac{b_0}{2 \cdot t_0} = \frac{30}{2 \cdot 2.5} = 6$$

где је:

$t_0$  – дебљина појасног профила.

Усвојено је да фактор  $k_n$  износи,  $k_n = 1.0$ .

За усвојени појасни профил граница развлачења износи,  $f_{y0} = 235 \text{ MPa}$

Вредност парцијалног степена сигурности износи  $\gamma_{M5} = 1.0$ .

За дијагоналну испуну, угао износи  $\theta_i = 45^\circ$ , док за вертикалну испуну угао износи  $\theta_i = 90^\circ$ .

За дијагоналну испуну прорачунска вредност носивости износи:

$$N_{i,Rd} = \frac{8.9 \cdot 6^{0.5} \cdot 1 \cdot 235 \cdot 2^2}{\sin 45^\circ} \cdot \left( \frac{20 + 20}{2 \cdot 30} \right) / 1.0$$

Чврстоћа на затезање слабијег спојеног дела

$$N_{i,Ed} \leq N_{i,Rd}; \quad 9498.618 \text{ N} < 19320.45 \text{ N}$$

Провере за Т, као и за К и N везу са размаком задовољавају потребне услове. Сада је потребно извршити прорачун дебљине завареног споја коришћењем *Израза 4.1*. стр. 46. ЕС 1993 1-8 [12]:

$$[\sigma_\perp^2 + 3 \cdot (\tau_\perp^2 + \tau_\parallel^2)]^{0.5} \leq \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}}$$

где су:

$\sigma_\perp$  - нормални напон управан на меродавну равну шаву,

$\tau_\perp$  - смичући напон (у меродавној равни шаву) управан на осу шаву,

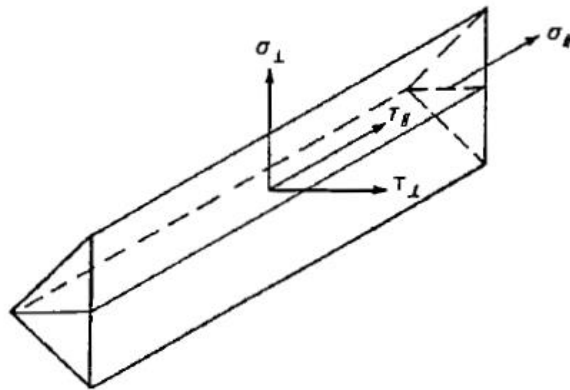
$\tau_\parallel$  - смичући напон (у меродавној равни шаву) паралелан са осом шаву,

$f_u$  – чврстоћа на затезање слабијег спојеног дела,

$\beta_w$  – одговарајући корелациони фактор из Табеле 4.1. []

$\gamma_{M2}$  – парцијални степен сигурности заварених спојева  $\gamma_{M2} = 1.25$  [стр. 19.

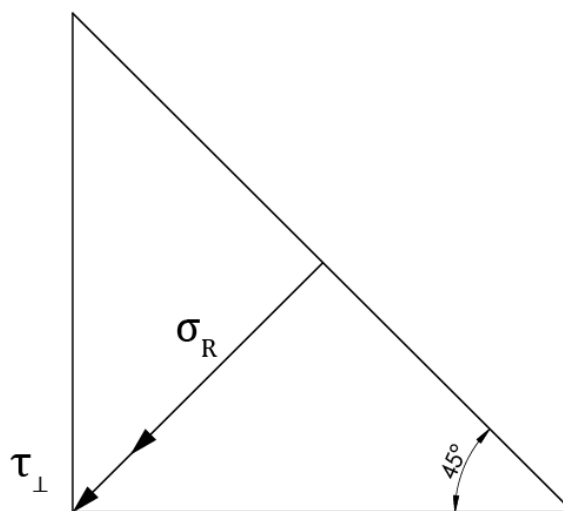
Напони у претходној једначини су графички приказани на слици 5.42.



Слика 5.42. Напони у меродавном пресеку шави, [12]

Пошто сила делује под углом, расподела напона дуж свих заварених спојева са свих страна профила није иста. Расподела оптерећења усвојена је на основу димензија странице, при чему шавови код краће странице профила (дужине 20 мм) преносе 40% оптерећења, док шавови код дуже странице профила преносе 60% оптерећења. Прорачун завареног споја је упрошћен, при чему се у овом случају подразумева да се контакт дијагоналне испуне и појасног профила остварује по целој површини попречног пресека, као у случају вертикалне испуне и појасног профила. Овом приликом је потребно напоменути да су све дијагоналне испуне оптерећене на притисак, па су самим тим унутрашње силе које се одупиру притиску (напон) супротног смера.

За део завареног споја који се налази са стране краће странице профила (преноси 40% дејства) расподела напона приказана је на слици 5.43.



Слика 5.43. Напони у меродавном пресеку шави

При прорачуну обима шави, због једноставнијег прорачуна, заобљења профила се нису узела у обзир:

$$O_{40\%} = 2 \cdot 20 = 40 \text{ mm}$$

Усваја се да ефективна дужина шави износи  $l_{eff} = 30 \text{ mm}$ . Сада се може одредити колику силу преносе одређени заварени спојеви.

$$F_{40\%} = 9498.618 \cdot 0.40 = 3799.447 \text{ N}$$

$$F_{60\%} = 9498.618 \cdot 0.60 = 5699.171 \text{ N}$$

Уочава се да је присутан напон  $\tau_{\perp}$ . Сада је потребно одредити вредност резултантног напона који делује на заварен спој коришћењем следећег обрасца [12]:

$$\sigma_R = \frac{F}{A} = \frac{F}{\sum a \cdot l_{eff}}$$

где су:

$F$  – аксијална сила,

$a$  – дебљина угаоног шава приказано на слици 4.4. (eng. *throat thickness*),

$l_{eff}$  – ефективна дужина шава.

$$\sigma_R = \tau_{\perp} = \frac{F}{a \cdot l_{eff}} = \frac{3799.447}{a \cdot 30}$$

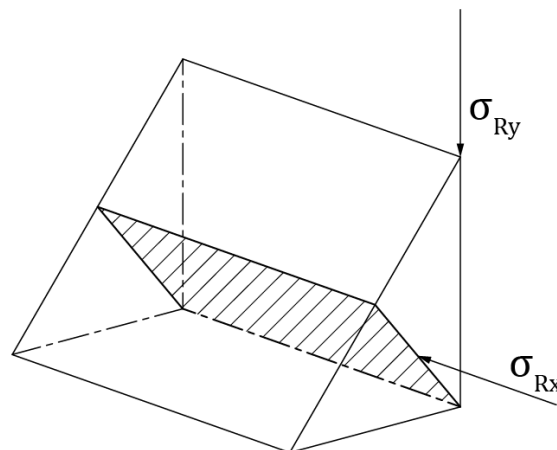
$$\left[ (0)^2 + 3 \cdot \left( \left( \frac{3799.447}{a \cdot 30} \right)^2 + 0^2 \right) \right]^{0.5} \leq \frac{235}{0.8 \cdot 1.25}$$

$$\left[ (0)^2 + 3 \cdot \left( \left( \frac{3799.447}{a \cdot 30} \right)^2 + 0^2 \right) \right]^{0.5} \leq \frac{235}{0.8 \cdot 1.25}$$

Коришћењем softvera WolframAlpha добија се да потребна дебљина завареног споја износи:

$$a = 0.933 \text{ mm}$$

Пошто је дијагонална испуна позиционирана под углом од  $45^\circ$  потребно је одредити вредности напона у обе осе као што је приказано на слици 5.44. Расподела напона  $\sigma_{Ry}$  приказана је на слици 5.44.



**Слика 5.44.** Напони у меродавном пресеку шава

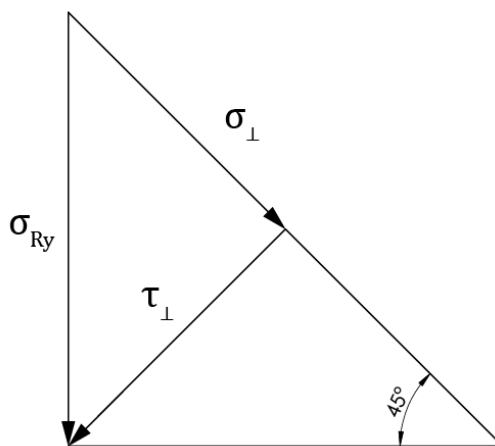
$$\sigma_{Rx} = \sigma_{Ry} = 5699.171 \cdot \cos 45^\circ = 4029.93 \text{ N}$$

$$\sigma_{Rx} = \tau_{\parallel} = 4029.93 \text{ N}$$

Обим овог дела шава износи:

$$O_{60\%} = 2 \cdot 30 = 60 \text{ mm}$$

Усваја се да ефективна дужина шава износи  $l_{eff} = 50 \text{ mm}$ . Расподела напона за овај део шава је приказана на слици 5.45.



Слика 5.45. Напони у меродавном пресеку шави

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{\sigma_{Ry}}{\sqrt{2}} = \frac{\frac{4029.93}{a \cdot 100}}{\sqrt{2}} = \frac{4029.93}{a \cdot 50 \cdot \sqrt{2}}$$

$$\left[ \left( \frac{4029.93}{a \cdot 50 \cdot \sqrt{2}} \right)^2 + 3 \cdot \left( \left( \frac{3799.4479}{a \cdot 30} \right)^2 + \left( \frac{4029.93}{a \cdot 50 \cdot \sqrt{2}} \right)^2 \right) \right]^{0.5} \leq 235$$

Коришћењем софтвера *WolframAlpha* одређена је потребна дебљина завареног споја:

$$a = 1.05 \text{ mm}$$

На основу добијених резултата, усвојена је дебљина шави  $a = 2 \text{ mm}$ , јер дебљина шави не сме бити мања од дебљине зида профила. Иако је реална површина два анализирана профила знатно мања од површине попречног пресека дијагоналне испуне, ако се у обзир узме чињеница да се посматра најкритичнија прорачунска ситуација, као и да се заварени спој такође остварује и са вертикалном испуном, усвојена дебљина завареног споја је и више него довољна.

### 5.3.3.2. Веза вертикалне испуне са појасним профилем

Првенствено је анализирана прорачунска носивост за Т везу, као и за К и N везу.

$$N_{i,Rd} = \frac{1 \cdot 235 \cdot 2^2}{(1 - 0.667) \cdot \sin 90^\circ} \cdot \left( \frac{2 \cdot 0.667}{\sin 90^\circ} + 4 \cdot (1 - 0.667)^{0.5} \right) / 1$$

$$N_{i,Rd} = 10281.415 \text{ N}$$

$$N_{i,Ed} \leq N_{i,Rd}; \quad 6716.537 \text{ N} < 10281.415 \text{ N}$$

Изабрани тип авареног споја пружа довољну чврстоћу конструкцији.

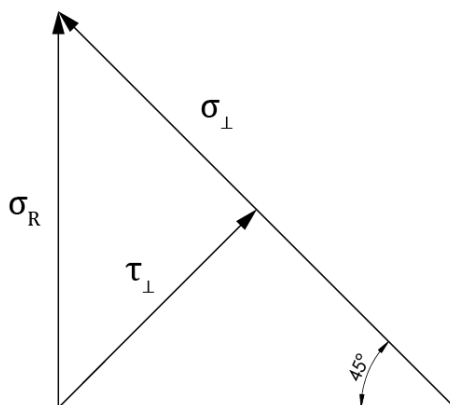
За вертикалну испону прорачунска вредност износи:

$$N_{i,Rd} = \frac{8.9 \cdot 7.5^{0.5} \cdot 1 \cdot 235 \cdot 2^2}{\sin 90^\circ} \cdot \left( \frac{20 + 20}{2 \cdot 30} \right) / 1.0$$

$$N_{i,Rd} = 15274.156 \text{ N}$$

$$N_{i,Ed} \leq N_{i,Rd}; \quad 6716.537 \text{ N} < 21600.919 \text{ N}$$

Провере за Т, као и за К и N везу са размаком задовољавају потребне услове. Сада је потребно извршити прорачун дебљине завареног споја. Потребно је напоменути да су све вертикалне испуне оптерећене на затезање, као и да је дејство напона на заварене спојеве са свих страна профила исто. Распоред напона приказан је на слици 5.46.



Слика 5.46. Напони у меродавном пресеку шава

Уочава се да су присутни напони  $\sigma_{\perp}$  и  $\tau_{\perp}$ . Обим шава износи за анализирани профил (30x20x2.5):

$$O_{30 \times 20} = 2 \cdot (30 + 20) = 100 \text{ mm}$$

Усваја се ефективна дужина шава  $l_{eff} = 80 \text{ mm}$ . Сада је потребно одредити вредност резултантног и парцијалних напона:

$$\sigma_R = \frac{F}{a \cdot l_{eff}} = \frac{6716.537}{a \cdot 80}$$

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{\sigma_R}{\sqrt{2}} = \frac{\frac{6716.537}{a \cdot 80}}{\sqrt{2}} = \frac{6716.537}{a \cdot 80 \cdot \sqrt{2}}$$

Сада се може извршити одређивање потребне дебљине завареног споја:

$$\left[ \left( \frac{6716.537}{a \cdot 80 \cdot \sqrt{2}} \right)^2 + 3 \cdot \left( \left( \frac{6716.537}{a \cdot 80 \cdot \sqrt{2}} \right)^2 + 0^2 \right) \right]^{0.5} \leq \frac{235}{0.8 \cdot 1.25}$$

$$\left[ \left( \frac{6716.537}{a \cdot 80 \cdot \sqrt{2}} \right)^2 + 3 \cdot \left( \left( \frac{6716.537}{a \cdot 80 \cdot \sqrt{2}} \right)^2 + 0^2 \right) \right]^{0.5} \leq 235$$

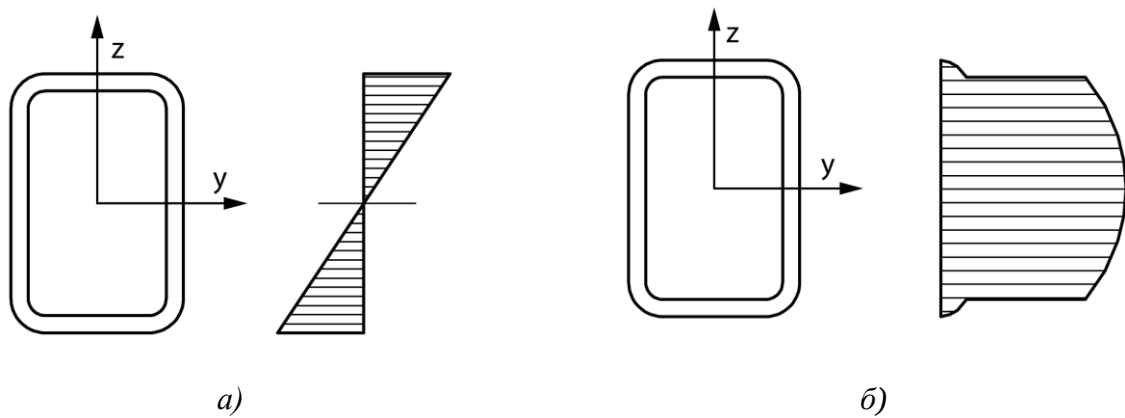
Коришћењем *software*-а *WolframAlpha* одређена је вредност потребне дебљине шава:

$$a = 0.5 \text{ mm}$$

Пошто дебљина завареног споја не сме бити мања од дебљине зида профила, усваја се да дебљина завареног споја износи  $a = 2 \text{ mm}$ .

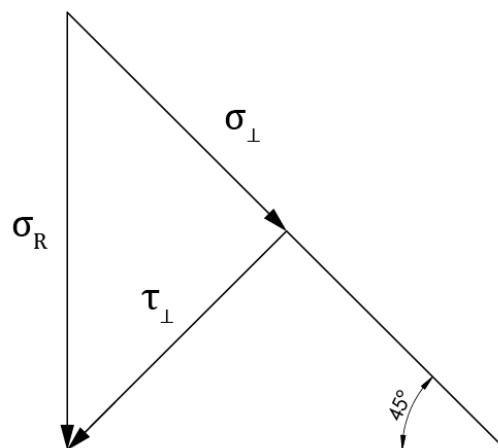
### 5.3.3.3. Веза попречне испуне са појасним профилем

У оквиру овог поглавља извршен је прорачун профила испуне који спаја две раванске решетке и служи као ослонац за цев за воду. Овај профил је претходно приказан на *Слици* 5.3. Услед дејства трансверзалне силе у овом случају је потребно извршити проверу завареног споја на основу момента савијања као и трансверзалних сила. Расподела нормалног (услед момента савијања) и смицајног (услед трансверзалних сила) напона приказана је на сликама 5.47. а) и б).



**Слика 5.47.** Расподела, (а) нормалног, (б) смицајног напона у попречном пресеку анализираниог профила

Расподела напона у меродавном пресеку шави за момент савијања приказана је на слици 5.48. Потребно је напоменути да је напон исто распоређен у шавовима на свих страна профила вертикалне испуне.

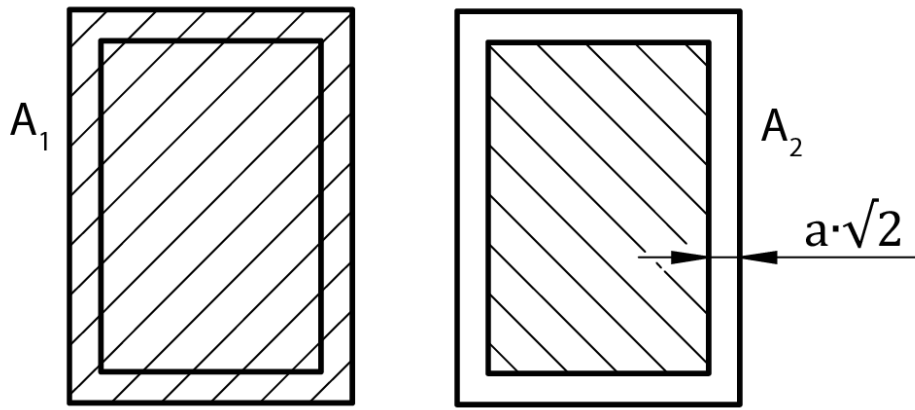


**Слика 5.48.** Расподела напона у меродавним пресецима шави

Сада је потребно одредити вредност резултантног напона. У циљу лакшег одређивања овог напона, усвојено је да је целокупна дужина завареног споја ефективна. Вредност резултантног напона може се одредити коришћењем следећг изрази, [8]:

$$\sigma_R = \frac{M_f}{W_{y\check{s}}}$$

За одређивање поларног отпорног момента завареног споја првенствено је потребно одредити његов момент инерције, релевантне површине су приказане на сликама 5.49. а) и б).



Слика 5.49. Расподела напона у меродавним пресецима шави

$$I_y = A_1 - A_2 = \frac{(20 + a \cdot \sqrt{2}) \cdot (30 + a \cdot \sqrt{2})^3}{12} - \frac{20 \cdot 30^3}{12}$$

На основу момента инерције, сада се може одредити поларни отпорни момент око у-у осе анализираног профила, [8]:

$$W_{y\check{s}} = \frac{I_{y\check{s}}}{z_{max}} = \frac{\frac{(20 + a \cdot \sqrt{2}) \cdot (30 + a \cdot \sqrt{2})^3}{12} - \frac{20 \cdot 30^3}{12}}{15 \cdot a \cdot \sqrt{2}}$$

где је:

$z_{max}$  – растојање крајње странице профила од тежишта профила.

Пошто је познат поларни отпорни момент, сада се може одредити и резултантни напон, као и његове парцијалне компоненте.

$$\begin{aligned} \sigma_R &= \frac{M_f}{W_{y\check{s}}} = \frac{487451.25}{\frac{\frac{(20 + a \cdot \sqrt{2}) \cdot (30 + a \cdot \sqrt{2})^3}{12} - \frac{20 \cdot 30^3}{12}}{15 \cdot a \cdot \sqrt{2}}}} \\ \sigma_{\perp} = \tau_{\perp} &= \frac{\sigma_R}{\sqrt{2}} = \frac{487451.25}{\frac{\frac{(20 + a \cdot \sqrt{2}) \cdot (30 + a \cdot \sqrt{2})^3}{12} - \frac{20 \cdot 30^3}{12}}{15 + a \cdot \sqrt{2}}}} \\ \sigma_{\perp} = \tau_{\perp} &= \frac{487451.25}{\frac{\frac{(20 + a \cdot \sqrt{2}) \cdot (30 + a \cdot \sqrt{2})^3}{12} - \frac{20 \cdot 30^3}{12}}{(15 + a \cdot \sqrt{2}) \cdot \sqrt{2}}}} \end{aligned}$$

На основу вредности парцијалних напона може се одредити минимална потребна дебљина завареног споја:

$$\left[ \left( \frac{\frac{487451.25}{\frac{\frac{(20 + 2 \cdot a \cdot \sqrt{2}) \cdot (30 + a \cdot \sqrt{2})^3}{12} - \frac{20 \cdot 30^3}{12}}{(15 + a \cdot \sqrt{2}) \cdot \sqrt{2}}}} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{\frac{487451.25}{\frac{\frac{(20 + a \cdot \sqrt{2}) \cdot (30 + 2 \cdot a \cdot \sqrt{2})^3}{12} - \frac{20 \cdot 30^3}{12}}{(15 + a \cdot \sqrt{2}) \cdot \sqrt{2}}}} + 0^2 \right)^2 \right]^{0.5} \leq 235$$



$$I_y = \frac{(20 + 2 \cdot \sqrt{2}) \cdot (30 + 2 \cdot \sqrt{2})^3}{12} - \frac{20 \cdot 30^3}{12} = 22304.634 \text{ mm}^4$$

$$\xi = 30 + 2 \cdot 5.66 = 41.32 \text{ mm}$$

$$\tau = \frac{F}{I_y} \cdot \frac{S_y}{\xi} = \frac{662.001}{22304.634} \cdot \frac{4434.245}{41.32} = 3.185 \text{ MPa}$$

Пошто је смицајни напон изузетно мали он се неће узети у обзир при прорачуну завареног споја. Пошто је прорачун извршен за најкритичнију прорачунску ситуацију може се усвојити да дебљина шава износи  $a = 4 \text{ mm}$ .

## 5.4. Прорачунавање ужета

Захваљујући изузетно високој вредности силе предњег ветра потребно је додатно стабилизovati конструкцију. У пракси, нпр. код водоторњева, ужад се често примењују у циљу побољшања крутости, па је стога ово решење примењено и у овом примеру.

Уже се може прорачунати на основу обрасца који се примењује код дизаличних конструкција, [13]:

$$F_r = k \cdot \frac{Q + G_k}{m \cdot \eta_k}$$

где су:

$F_r$  – најмања рачунска сила кидања ужета,

$k$  – степен сигурности за уже,

$Q$  – тежина терета,

$G_k$  – тежина куке,

$m$  – број кракова катураче,

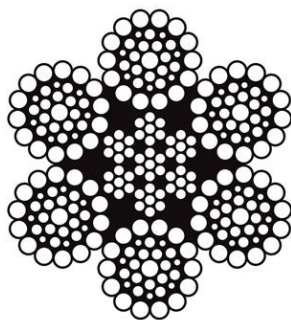
$\eta_k$  – степен искоришћења катураче.

Пошто код анализираног случаја нису присутне катураче и куке, вредности ових релевантних фактора су редом  $G_k = 0 \text{ kN}$ ,  $m = 1$  и  $\eta_k = 1$ . Степен сигурности за уже усвојен је за прву погонску класу дизалица, и то првенствено због чињенице да уже у анализираном случају неће бити оптерећено као код дизаличне конструкције,  $k = 4.5$ , [13]. Као меродавна тежина терета усваја се максимална сила ветра,  $Q = 60 \text{ kN}$ .

$$F_r = 4.5 \cdot \frac{60 + 0}{1 \cdot 1} = 270 \text{ kN}$$

Из безбедносних разлога усвајено је да једно уже може да истрпи максимално оптерећење при највећем удару ветра. На основу добијене вредности прекидне рачунске силе потребно је усвојити уже *S3i Group 6x36 Stainless Steel Wire Rope – 316 Marine Grade Stainless Steel* дебљине  $d = 28 \text{ mm}$ , рачунске прекидне силе од  $F_r = 312.03 \text{ kN}$ , [14].

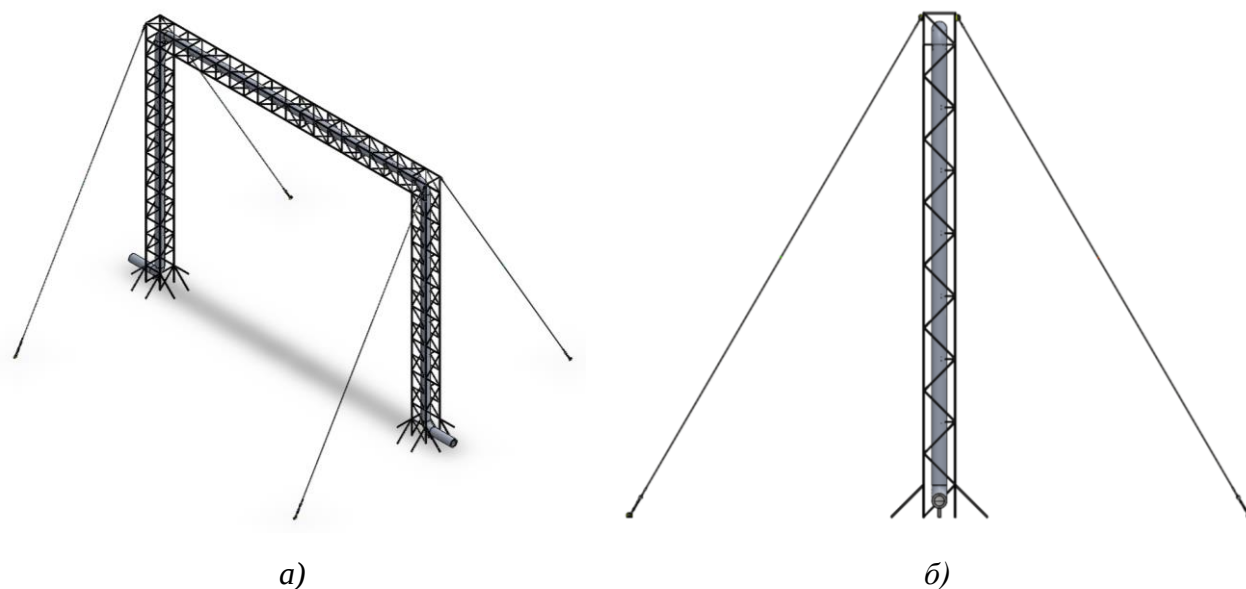
Услед чињенице да се усвојени степен сигурности односи на динамичке конструкције и да се у овом случају више може посматрати као нека оријентациона вредност, затим уколико се узме у обзир да постоји мала вероватноћа за појавом најкритичније вредности ветра као и да се целокупно оптерећење преноси на два ужета, може се усвојити уже мање дебљине. За анализирано оптерећење усвојено је уже *S3i Group 6x36 Stainless Steel Wire Rope – 316 Marine Grade Stainless Steel* дебљине  $d = 20 \text{ mm}$ , рачунске прекидне силе  $F_r = 223.74 \text{ kN}$ , [14]. Попречни пресек усвојеног ужета приказан је на слици 5.51.



Слика 5.51. Попречни пресек усвојеног ужета, [14]

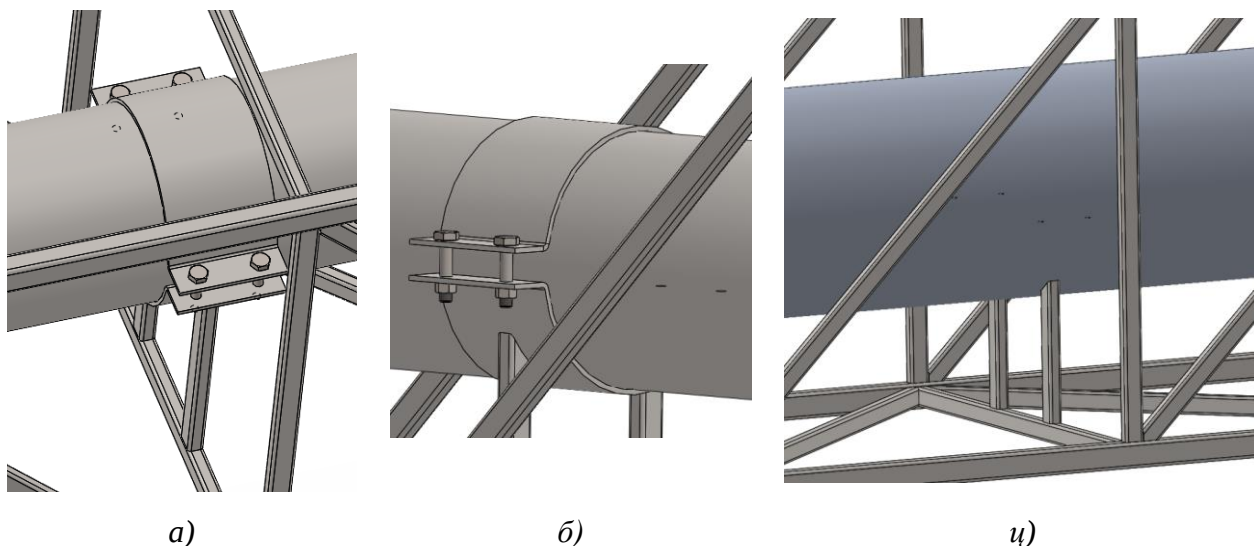
## 6. Креиран 3Д модел

У оквиру овог поглавља представљене су неке основне специфичности и конструкциона извођења реалне решеткасте конструкције. Финални склоп решеткасте конструкције приказан је на слици 6.1.



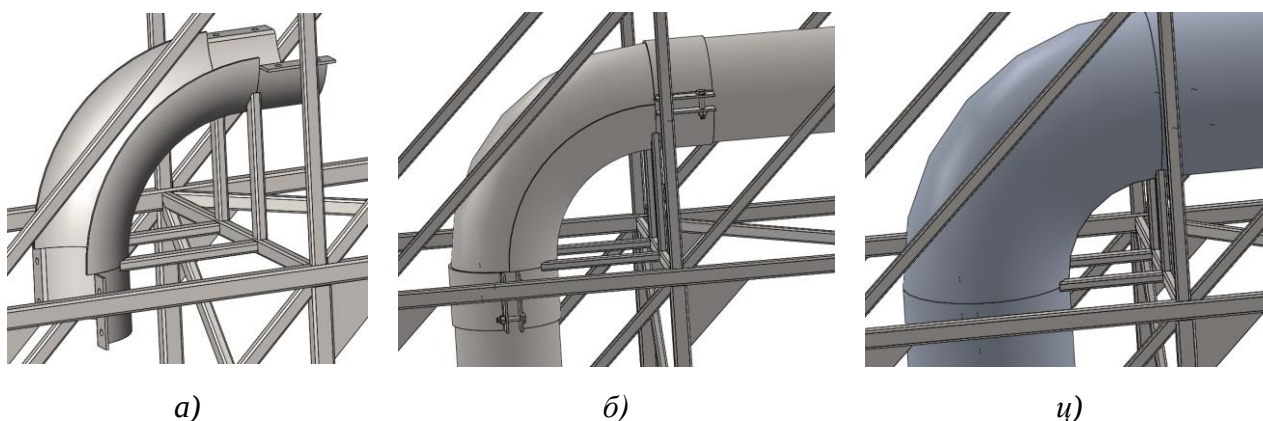
**Слика 6.1.** Приказ целокупног склопа

Начин ослањања цеви за воду на хоризонталном делу решетке приказан је на сликама 6.2 а), б) и ц). Доњи ослонац је путем завареног споја повезан са два профила испуне (30x20x2.5) који су директно заварени за решеткасту конструкцију. Горњи део ослонца се може поставља помоћу завртњева као што је приказано на слици 6.2. а). Причвршћивање ове везе остварује се путем једне навртке као што је приказано на слици 6.2. б). По постављању изолације и заштитне алуминијумске цеви овај ослонац се не види (потопљен је у изолацију) као што је приказано на слици 6.2. ц).



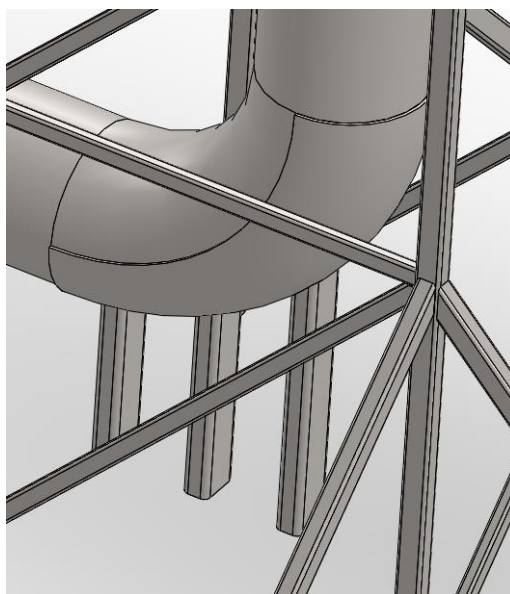
**Слика 6.2.** Ослањање цеви са водом на хоризонталном делу решетке

На прелазу вертикалне секције у хоризонталну потребно је такође извршити ослањање цеви за воду. Конструкционо решење за анализирану решеткасту конструкцију приказано је на сликама 6.3. а), б) и ц) при чему се за ослонац цеви користи доња половина кривине R375  $\phi$ 250x5 (сечено по оси кривине) као што је приказано на слици 6.3. а),  $\phi$ 250 је унутрашњи пречник цеви. Ова кривина се на својим крајевима везује завареним спојем за носеће профиле испуне (30x20x2.5) и два ослонаца, као што је приказано на слици 6.3. а). Причвршћивање цеви се врши као и на претходно описаном примеру код хоризонталног и вертикалног дела решетке (слика 6.3. б). Ови елементи се не виде по постављању изолације и заштитне алуминијумске цеви (слика 6.3. ц).

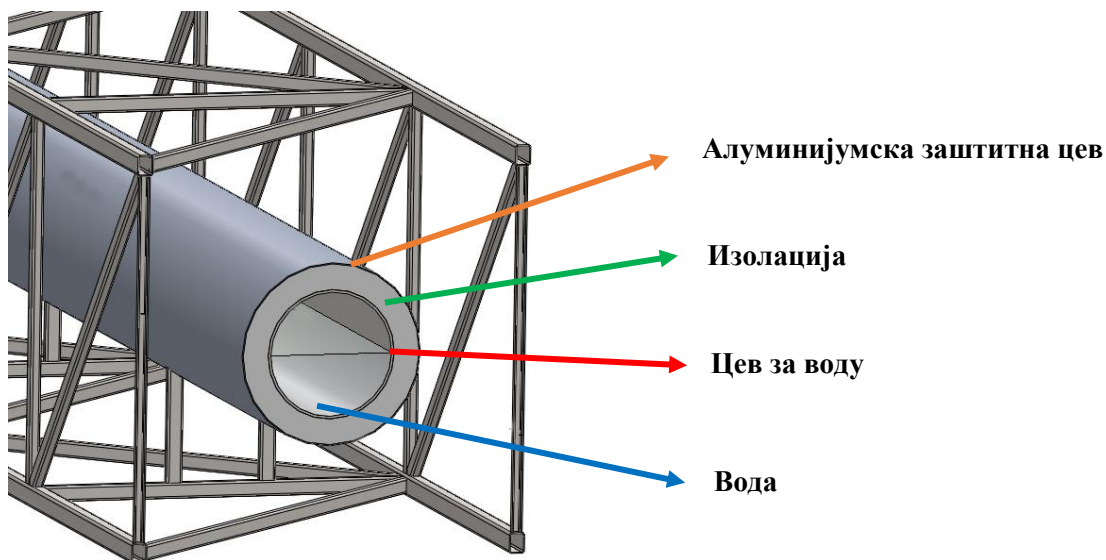


**Слика 6.3.** Ослањање горње кривине цеви са водом

Ослањање на местима где цев са водом „улази“ и „излази“ из решетке приказано је слици 6.4. Основна разлика је да се кривина завареним спојем везује за три профила 70x40x5, и то првенствено због чињенице да ће ова три профила „носити“ оптерећење од цеви и воде у вертикалном делу решеткасте конструкције. Ова кривина се такође неће видети по постављању изолације и заштитне алуминијумске цеви. Потребно је напоменути да се за једну страну решеткасте конструкције може користити једна кривина R375  $\phi$ 250x5, при чему ће се један исечак користити за доњу, а други исечак за горњу кривину. За целокупну решеткасту конструкцију потребне су две кривине претходно напоменутих димензија.

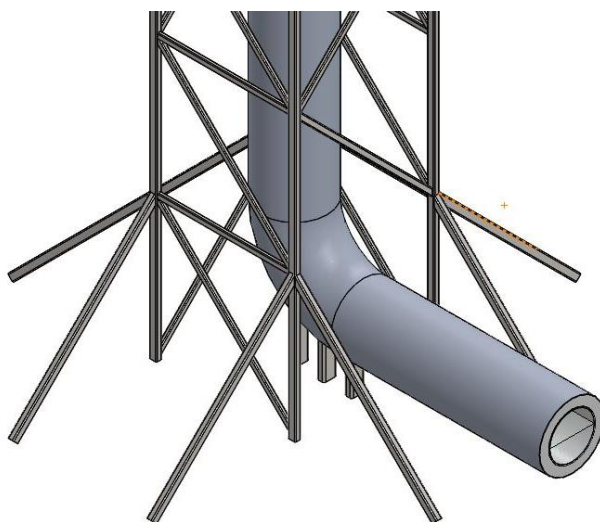


**Слика 6.4.** Ослањање доње кривине цеви са водом



**Слика 6.5.** Попречни пресек цеви са пратећим елементима (изолација и алуминијумска заштитна цев)

Попречни пресек цеви са изолацијом приказан је на слици 6.5. Цев са водом мора бити изолирана, јер у зимским месецима може доћи до замрзавања воде што може имати негативан утицај на целокупну конструкцију.



**Слика 6.6.** Додатни елементи за фиксирање решеткасте конструкције

Како би се извршило боље фиксирање решеткасте конструкције за тло, у подножју је додато по 8 дијагоналних 40x30x2 профила. На овај начин остварује се боља стабилност целокупне конструкције јер је број фиксних тачака са подлогом значајно повећан. Конструкционо решење је приказано на слици 6.6.

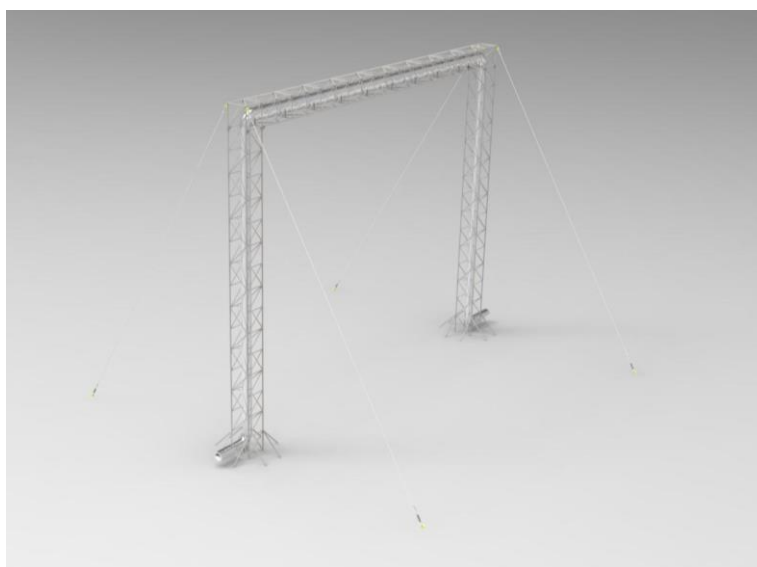
Начин причвршћивања ужета за подлогу и решеткасту конструкцију приказан је на сликама 6.5. а) и б). На подлогу и решеткасту конструкцију постављене су специјалне куке (компонента жуте боје на слици 6.5.) *Pewag AWHW 3,8* носивости 3800 кг, [15]. На месту везивања ужета за подлогу подлоге постављен је „затезач“ ужета *Van Beest G-6311* носивости 4540 кг, [16]. Овај уређај омогућава подешавање затегнутости ужета и самим тим њим се може дефинисати при ком граничном померању ће доћи до затезања ужета и спречавања настанка даљих угиба. Потребно је још напоменути да је крај ужета савијен коришћењем стандардних процедура, при чему се контакт између ужета и затезача/специјалне куке остварује путем металног уметка као што је приказано на сликама 6.7. а) и б). Усвојен је уметак компаније *S3i*

*Group* за уже пречника 20 мм, при чему је потребно напоменути да иста компанија производи и усвојено уже, [17].



**Слика 6.7.** Причвршћивање ужета за подлогу и решеткасту конструкцију

Поред 3D модела креираног у софтверском пакету *SolidWorks*, креиран је и фотореалистичан приказ пројектоване решеткасте конструкције (слика 6.8.) коришћењем софтвера *KeyShot 5.0*.



**Слика 6.7.** Фотореалистичан приказ креиране конструкције

Основне карактеристике конструкције које су одређене на основу креираног 3D модела приказане су у табели 6.1.

**Табела 6.1.** Основне карактеристике конструкције

|                                                |                              |
|------------------------------------------------|------------------------------|
| Маса решеткасте конструкције                   | 906 кг                       |
| Маса решеткасте конструкције без воде          | 3023 кг                      |
| Габаритне димензије (Дужина x Ширина x Висина) | 15040 мм x 780 мм x 12045 мм |

## 7. Остали параметри и напомене за конструкцију

Поред основних параметри конструкције који се односе на димензије, масу, заварене спојеве итд. потребно је представити и остале параметре кој исе првенствено односе на животни век и цену анализиране конструкције. За ову решеткисту конструкцију усвојен је животни век од 25 година при чему је став аутора да се овако дуг животни век може постићи уз правилно одржавање, при чему овај период вероватно може бити и знатно дужи.

Цена конструкције отприлике износи око 10000-12000 евра. Узевши у обзир да се целокупна конструкција састоји од око 300 профила укупне дужине од приближно 250 м може се рећи да њихова цена износи скоро 5000 евра. Усвојено је да цена извођења заварених спојева као и радне снаге потребне за сечење профила и заваривање износи око 2000 евра. Цена једног ужета износи око 150 евра, при чему сва четири ужета коштају око 600 евра. Узевши у обзир пратећу опрему, може се рећи да ужад са свим потребним елементима коштају 1000 евра. Може се рећи да се за 2000 евра може купити метална цев као и потребна заштитна изолација. Коначно се морају узети у обзир и трошкови монтаже целокупне конструкције, при чему је потребно платити транспорт свих елемената, кран, и потребну радну снагу. Став аутора је да финална цена конструкције не би требала да премаши цифру од 15000 евра.

Како би решеткиста конструкција задржала своје карактеристике и успешно одговорила свим потребним захтевима у току њеног животног века, потребно је вршити правилно одржавање. Првенствено је потребно извршити следеће провере:

- фарбати конструкцију на сваких 5 година,
- испуштати воду из система у току зиме или дужих временских периода када се не врши заливање,
- вршити проверу заварених спојева и ужади на почетку и крају сезоне заливања,
- провера конструкције на појаву корозије,
- вршење других релевантних провера које захтевају надлежни органи.

## 8. Закључак

Аналитички прорачун решеткастих носача данас се ретко примењује због своје сложености и обима посла, па се већина конструктора одлучује за коришћење сложених нумеричких софтвера. Међутим, како би се успешно користили сложени нумерички софтвери за прорачун решеткастих носача, потребно је да конструктор буде упознат и са основама аналитичког прорачуна. Овакав приступ омогућава конструктору да се у потпуности упозна са током прорачуна, али и да понекад релативно брзо изврши проверу резултата добијених нумеричким софтвера.

У оквиру овог рада представљен је аналитички процес пројектовања једне раванске решеткасте конструкције. Аналитички прорачун носача се данас због тачности и брзине прорачуна врши коришћењем Еврокодова. Овај приступ је коришћен у оквиру овог рада, јер је применом Еврокодова знатно олакшан и скраћен процес избора материјала, одређивање дејстава ветра, снега итд., затим провера штапова на затезање, притисак, извијање, савијање итд., као и прорачун заварених спојева. Ипак ове стандардизоване документе није могуће применити у сваком делу природног тока конструисања/прорачуна, па је тако одређивање сила у штаповима решетке или пак угиба решетке, ипак потребно извршити коришћењем традиционалних метода.

По завршеном аналитичком прорачуну, креиран је и одговарајући 3Д модел као и пратећа техничка документација у софтверском пакету *SolidWorks*. Креиран је и фотореалистичан приказ пројектоване решеткасте конструкције коришћењем софтвера *KeyShot 5.0*. У финалном делу овог рада укратко је анализирана цена пројектоване конструкције, а представљена су и основна правила за њено одржавање.

Основни циљ аутора овог рада је да представи сам процес аналитичког прорачуна раванске решеткасте конструкције на што практичнији начин, како би читалац стекао нека основна практична знања. Поред основног прорачуна који је детаљно приказан у оквиру овог рада, само практично пројектовање решеткасте конструкције у одабраном 3Д софтверу аутору је помогло да стекне искуство у овој области. Очекивања аутора су да ће му стечена знања помоћи у даљој професионалној каријери.

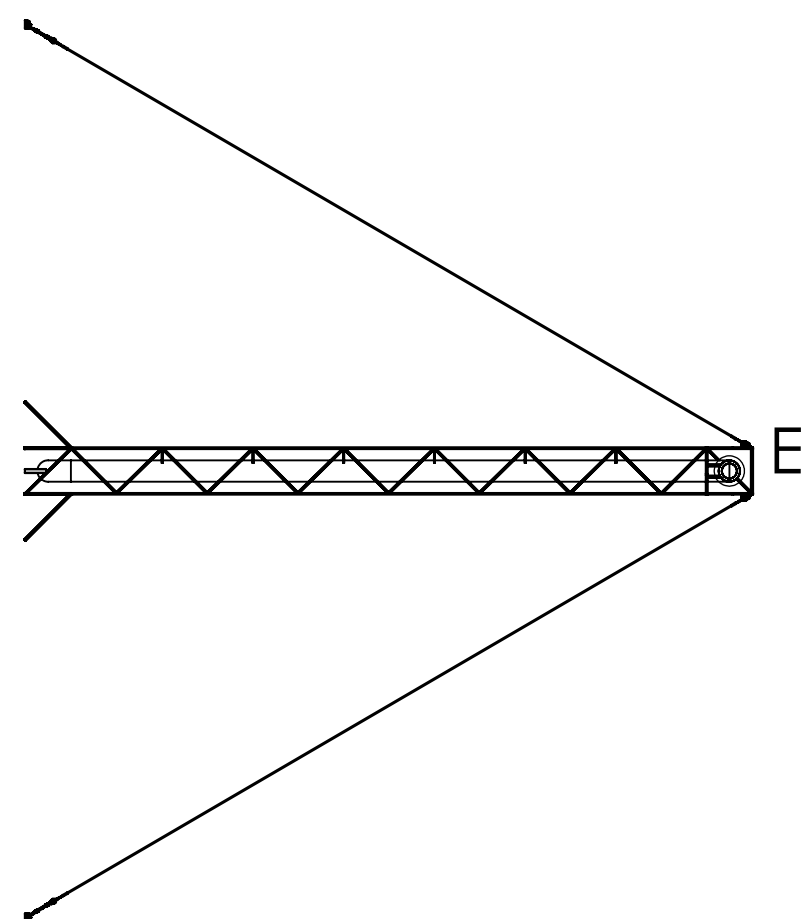
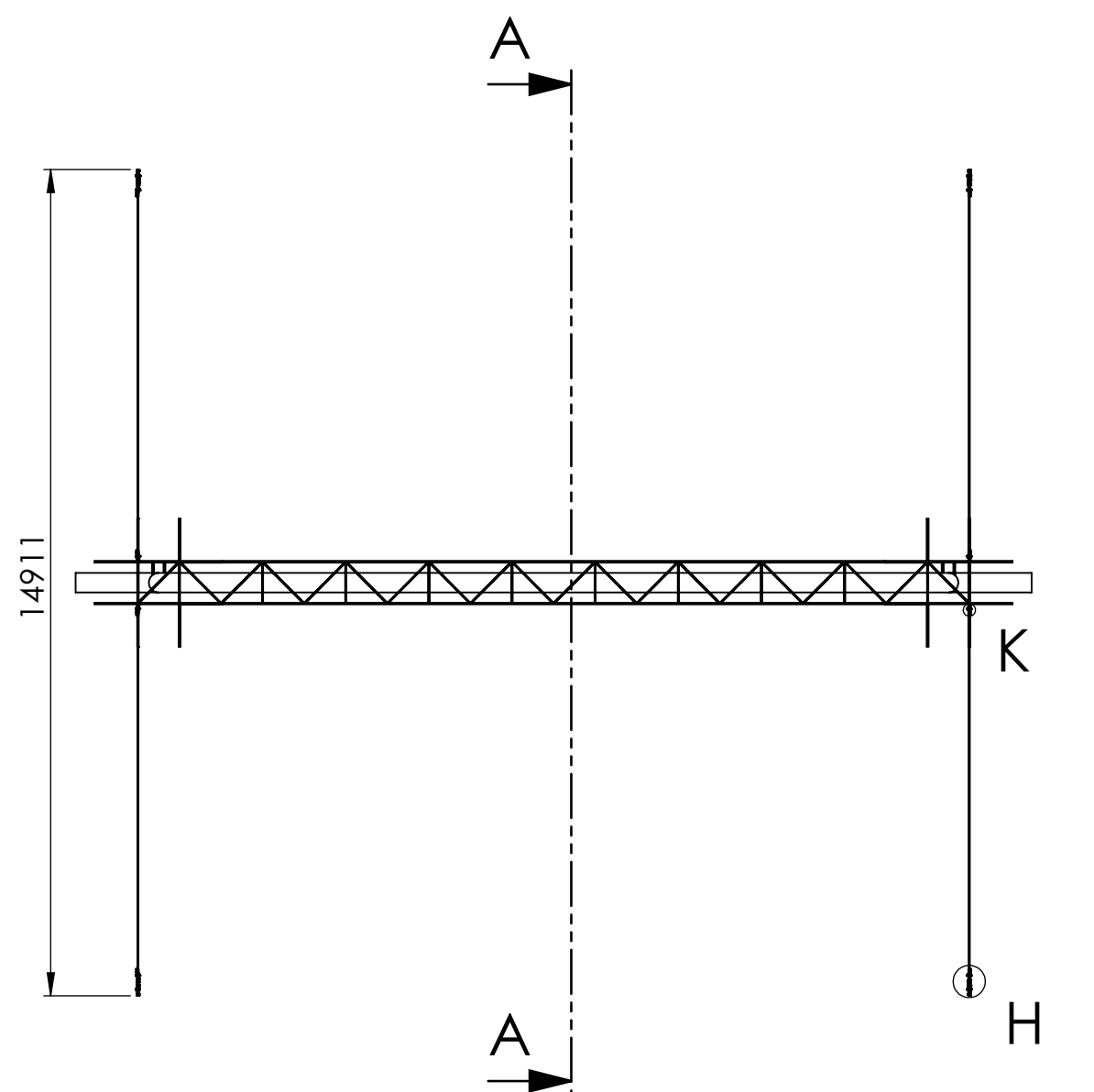
## 9. Литература

- [1] И. Прокофиев, Теорија конструисања, Научна књига Београд, 1986
- [2] М. Ћировић, Отпорност материјала, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2006
- [3] Предавања и вежбе из предмета *Отпорност материјала* на Факултету Инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, скрипта, И. Милетић, Р. Николић
- [4] Р. Вујанац, Предавања и вежбе из предмета *Компјутерска анализа конструкција* на Факултету Инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, скрипта
- [5] *Еврокод ЕС 1991-1-3:2003*, Грађевински факултет Универзитета у Београду, 2009.
- [6] В. Лазић, М. Јовановић, Д. Адамовић, Основи заваривања, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2005
- [7] *Еврокод ЕС 1993-1-8:2005*, Грађевински факултет Универзитета у Београду, 2006.
- [8] *Еврокод ЕС 1991-1-1:2005*, Грађевински факултет Универзитета у Београду, 2009
- [9] Дејства на конструкције 1-9, збирка стандарда, научна књига, Београд, 1989
- [10] *Еврокод ЕС 1991-1-4:2005*, Грађевински факултет Универзитета у Београду, 2009.
- [11] *Еврокод ЕС 1993-1-1:2005*, Грађевински факултет Универзитета у Београду, 2006.
- [12] *Еврокод ЕС 1991-1-4:2005*, Грађевински факултет Универзитета у Београду, 2009
- [13] Понуда кутијастих профила компаније Atenic Commerce из Чачка, доступна на интернет адреси (07.02.2017.): <http://www.atenic-commerce.com/cevi.html#savne-cevi>
- [14] Таблица стандардних кутијастих профила преузета је са интернет адресе (07.02.2017.): [https://www.voestalpine.com/krems/static/sites/c021/downloads/de/broschueren/VAKR\\_VHP-TD\\_DE\\_EN.pdf](https://www.voestalpine.com/krems/static/sites/c021/downloads/de/broschueren/VAKR_VHP-TD_DE_EN.pdf)
- [15] Russell C. Hibbeler, *Mechanics of Materials 8<sup>th</sup> edition*, Април 2010.
- [16] *Cranes and Derricks 4<sup>th</sup> edition*, Lawrence Shapiro, Jay Shapiro, Октобар 2010.
- [17] Предавања и вежбе из предмета *Основи транспортних машина* на Факултету Инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу
- [18] Карактеристике усвојеног ужета могу доступне су на следећој интернет адреси (07.02.2017.): <https://www.s3i.co.uk/6x36-wire-rope.php>
- [19] Карактеристике специјалне куке доступне су на следећој интернет адреси (07.02.2017.): [http://www.pewagchain.com/Products/Chain-systems/Anschlagmittel/Zubehorteile/CW-Connex-Verbindungsglied-\(23\).aspx](http://www.pewagchain.com/Products/Chain-systems/Anschlagmittel/Zubehorteile/CW-Connex-Verbindungsglied-(23).aspx)
- [20] Карактеристике затезача ужета су доступне на следећој интернет адреси (07.02.2017.): <http://www.vanbeest.com/getattachment/bdb66cd8-a660-4883-a7b1-ad64dbb58451/Chapter06-Turnbuckles.aspx>
- [21] Карактеристике металног дела путем којег се остварује контакт ужета и затезача су доступне на следећој интернет адреси (07.02.2017.): <https://www.s3i.co.uk/stainless-steel-rope-thimble.php>

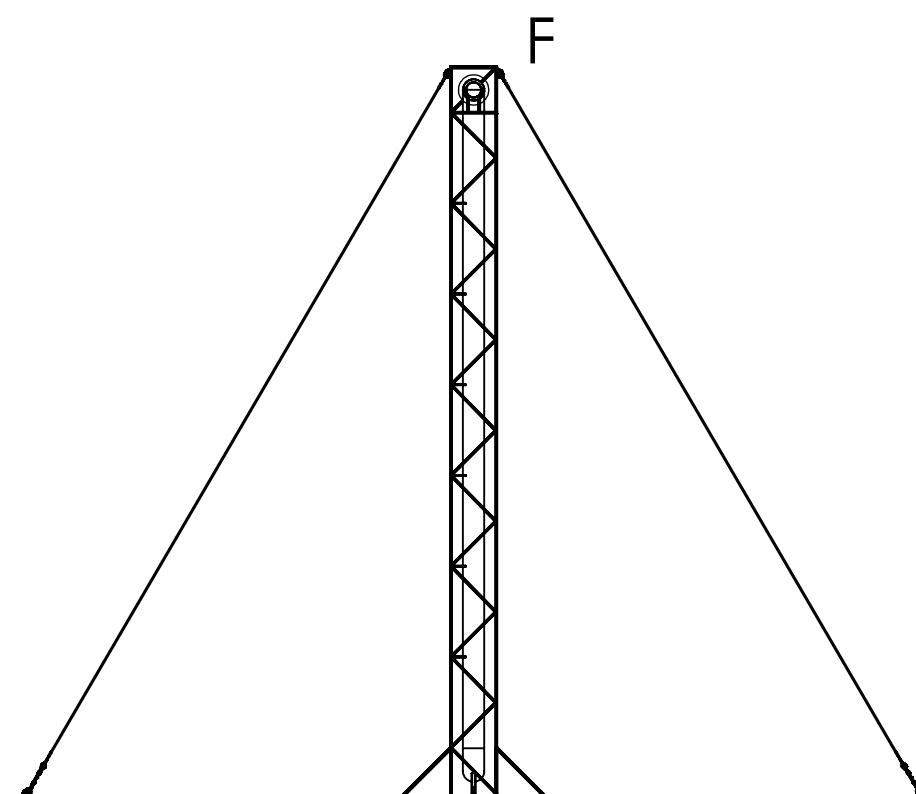
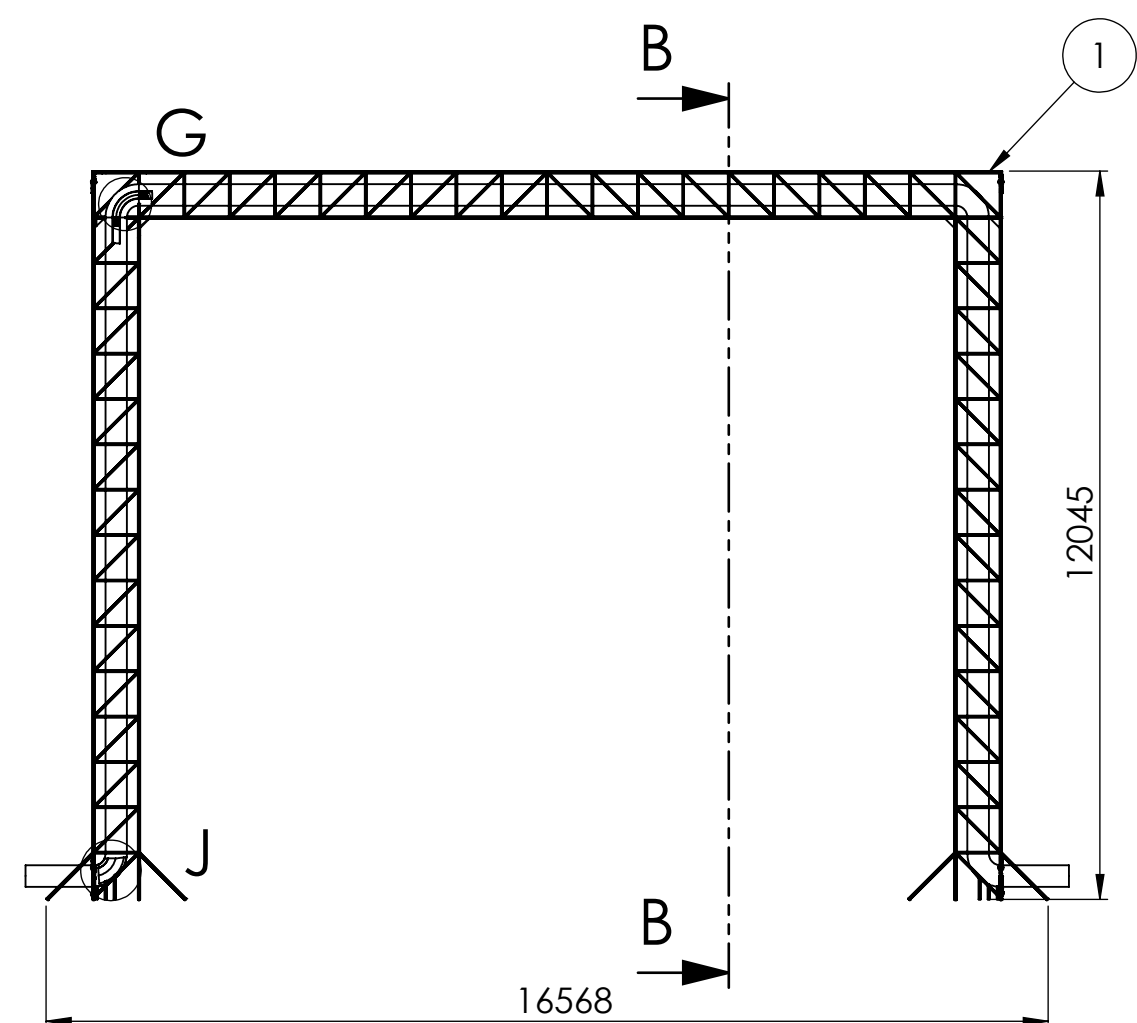
## 10. Додатак

Због саме величине анализиране решеткасте конструкције, скице сила у оквиру решеткасте конструкције су представљене на засебним цртежима који се прилажу у овом анексу. Приложена је један цртеж А3 формата са следеће две скице:

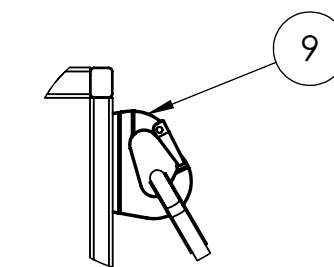
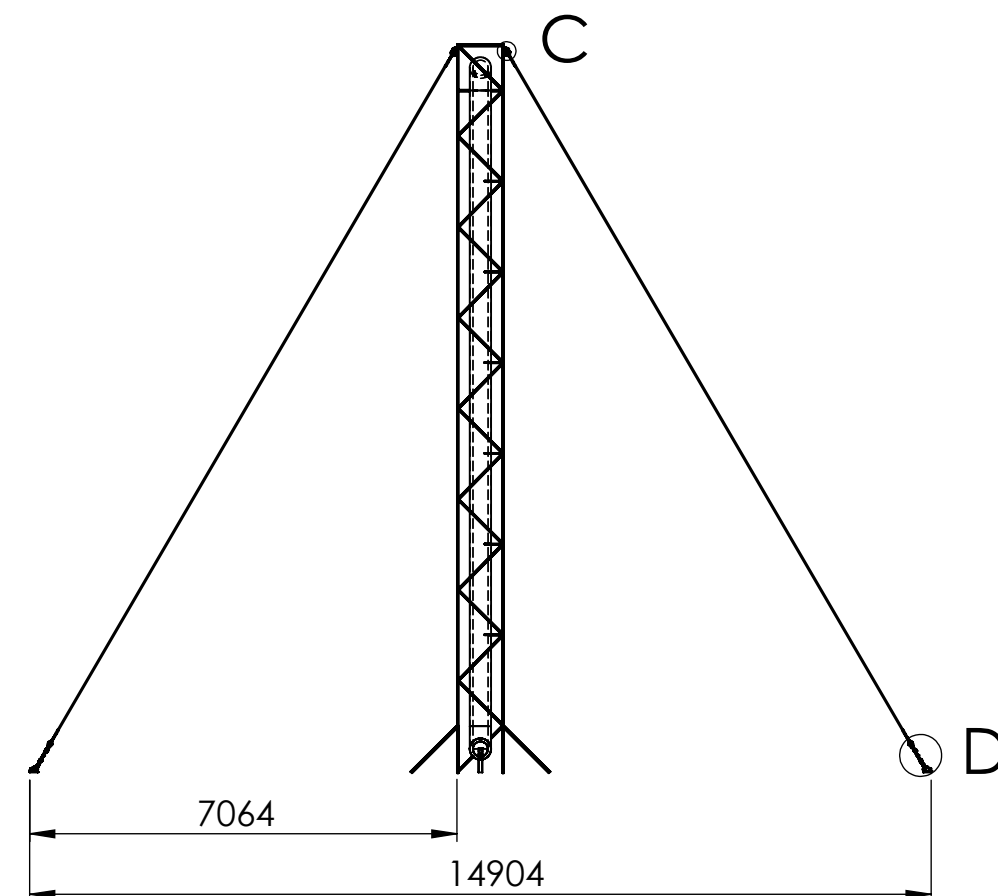
- Смерови и интензитети сила у свим штаповима хоризонталног дела решетке (реална оптерећења)
- Смерови и интензитети сила у свим штаповима хоризонталног дела решетке (виртуелно оптерећење од 1 kN)



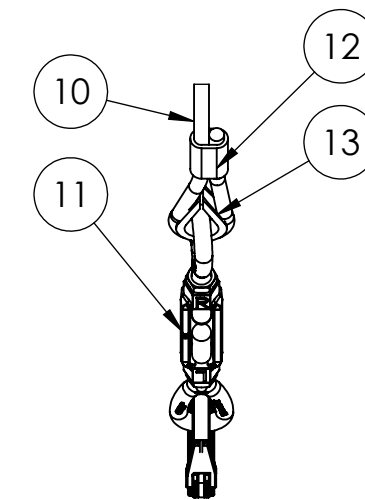
Presek A-A



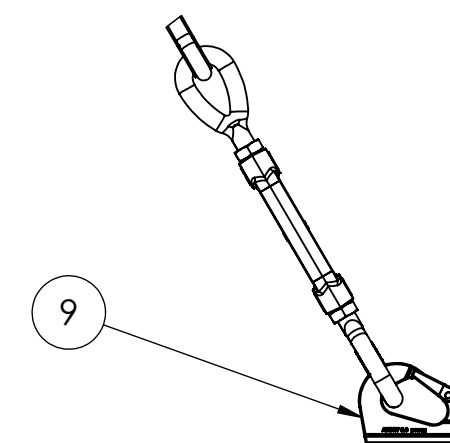
Presek B-B



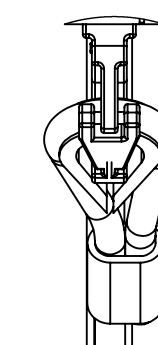
Detalj C  
Razmera 1:10



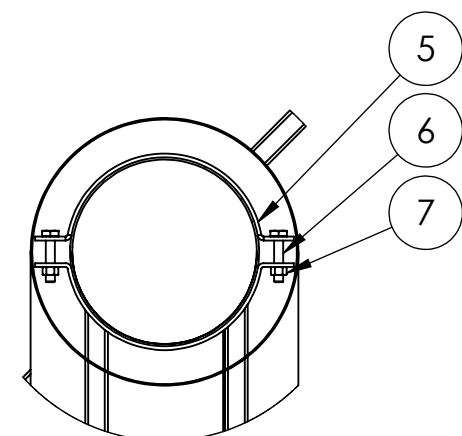
Detalj H  
Razmera 1:10



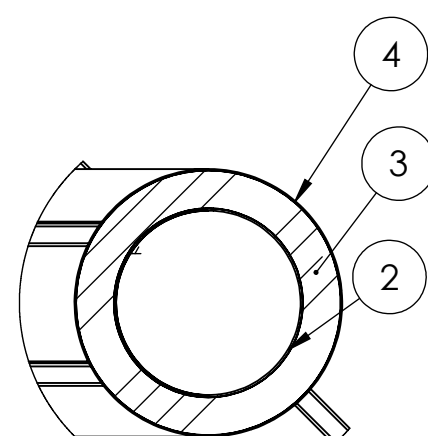
Detalj D  
Razmera 1:10



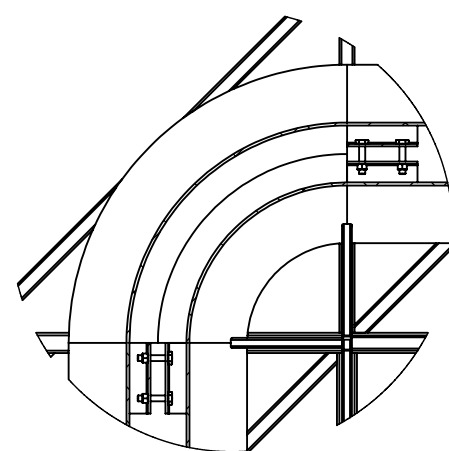
Detalj K  
RAzmera 1:5



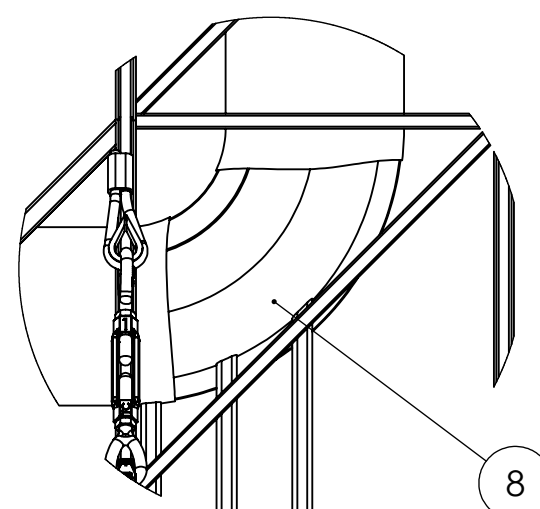
Detalj F  
Razmera 1:10



Detalj E  
Razmera 1:10



Detalj G  
Razmera 1:15

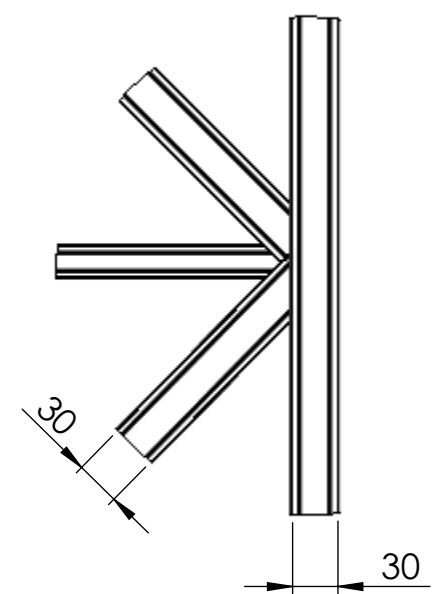
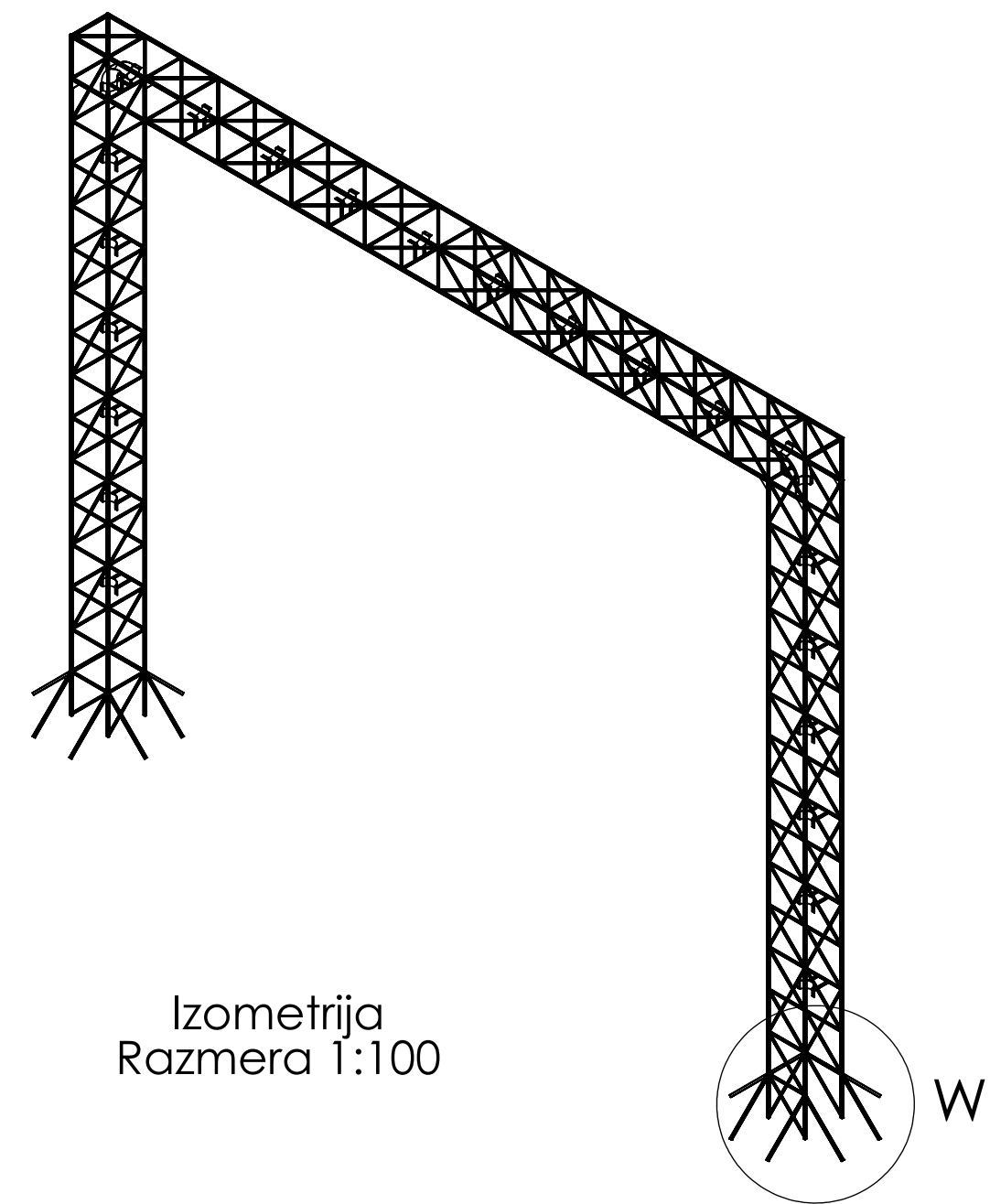
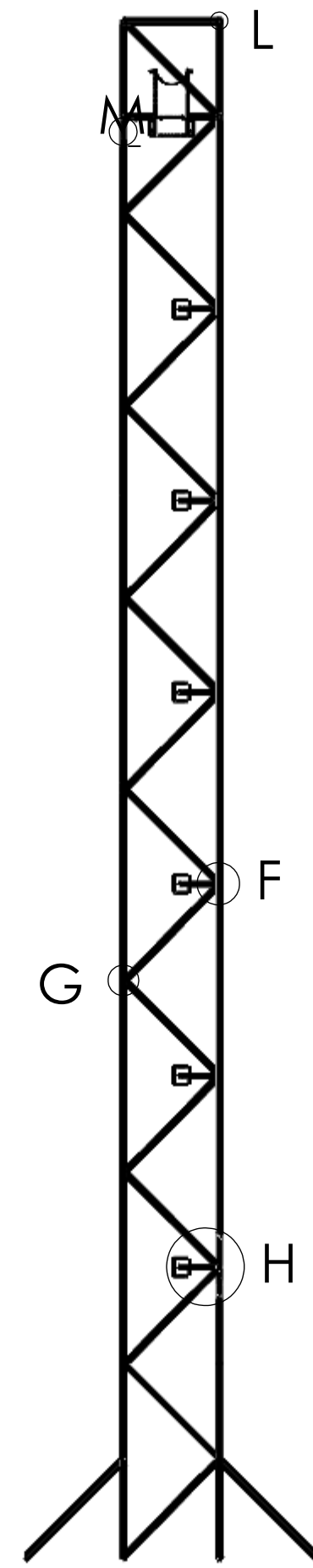
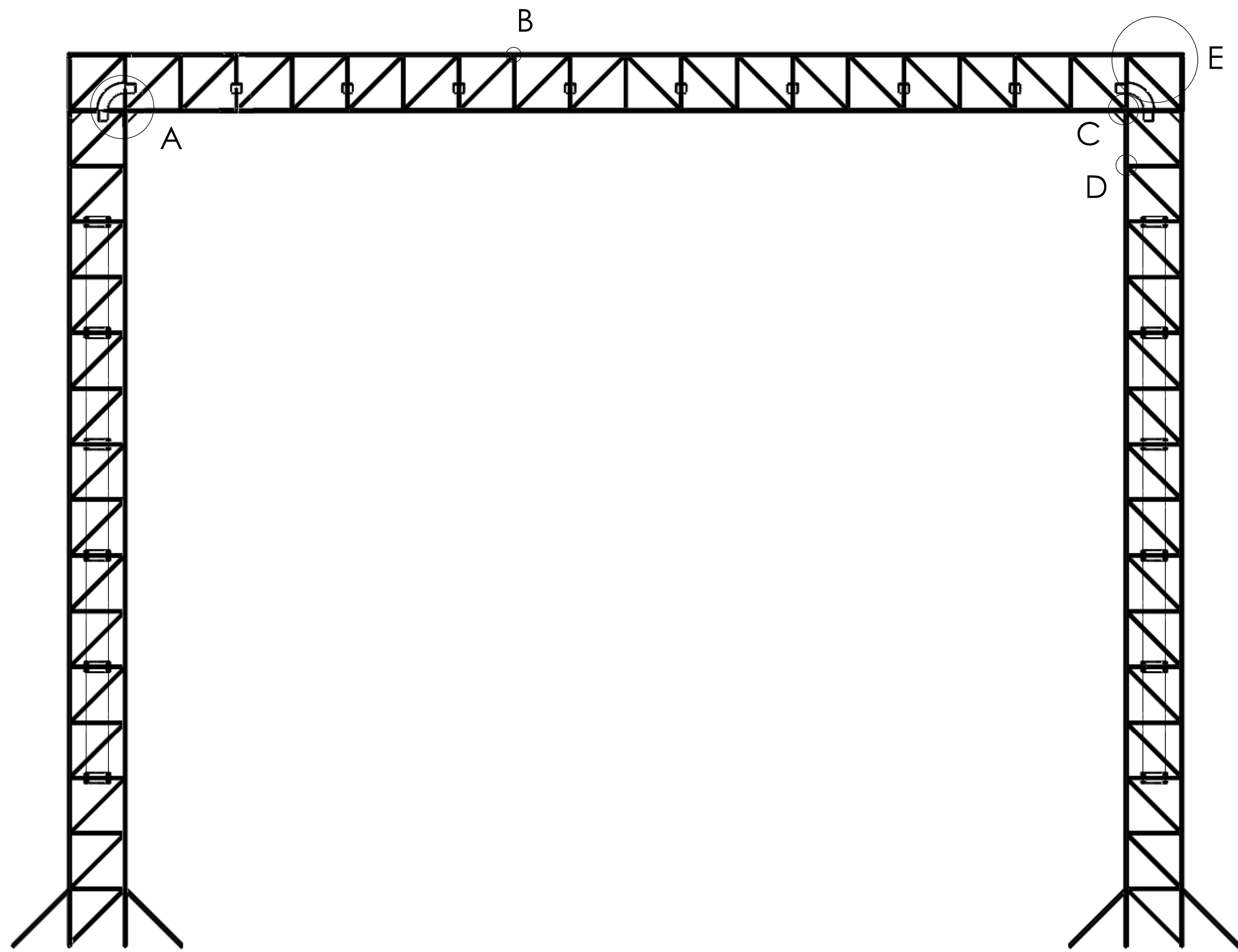


Detalj J  
Razmera 1:15

|    |                                                         |    |
|----|---------------------------------------------------------|----|
| 13 | S3i group, Stainless Steel Timble, D20                  | 8  |
| 12 | Pritezač užeta                                          | 8  |
| 11 | Van Beest Turnbuckle SSGPOO2506 (4.54 t)                | 4  |
| 10 | S3i Group 6x36 Stainless Steel Rope (Marine grade), D20 | 4  |
| 9  | Pewag Weld on Hook (3800 kg)                            | 8  |
| 8  | Donji oslonac cevi                                      | 2  |
| 7  | ISO 4032 M12                                            | 96 |
| 6  | DIN 6914 M12x60x23                                      | 96 |
| 5  | Poklopac nosača cevi                                    | 24 |
| 4  | Zaštitna Alu cev                                        | 1  |
| 3  | Izolacija                                               | 1  |
| 2  | Čelična cev za vodu                                     | 1  |
| 1  | Rešetkasta konstrukcija                                 | 1  |

| Red. br. | Ime komponente | Količina |
|----------|----------------|----------|
|----------|----------------|----------|

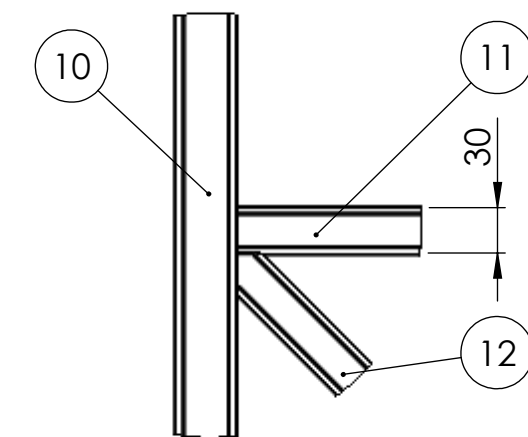
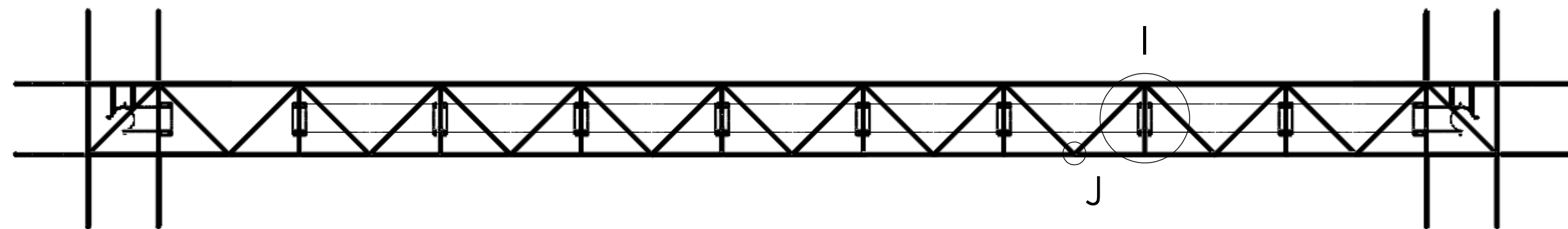
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |        |       |     |                                                                                                      |  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|-------|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| <div> <div> <div></div> <div></div> </div> <div> <div>Datum</div> <div>05.07.2017.</div> </div> <div> <div>Obradio</div> <div>Nenad Nikolić</div> </div> <div> <div>Crtao</div> <div></div> </div> <div> <div>Uskla. SRPS</div> <div></div> </div> <div> <div>Overio</div> <div></div> </div> </div> |        |       |     | <div> <div>Masa:</div> <div>3022.9 kg</div> </div> <div> <div>Razmera:</div> <div>1:125</div> </div> |  |
| <div> <div>Naziv:</div> <div>Sklopni crtež progresivnog alata u donjem položaju</div> </div>                                                                                                                                                                                                         |        |       |     | <div> <div>Oznaka:</div> <div></div> </div> <div> <div>List:</div> <div></div> </div>                |  |
| <div> <div>Fakultet Inženjerskih nauka u Kragujevcu</div> </div>                                                                                                                                                                                                                                     |        |       |     | <div> <div>Izv. pod.</div> <div></div> </div> <div> <div>Zamena za:</div> <div></div> </div>         |  |
| St. i.                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Izmene | Datum | Ime |                                                                                                      |  |



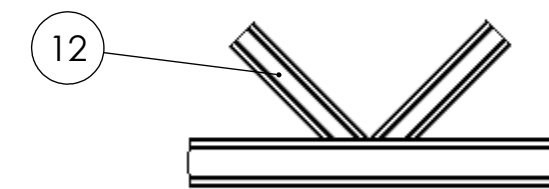
Detalj F  
Razmera 1:5



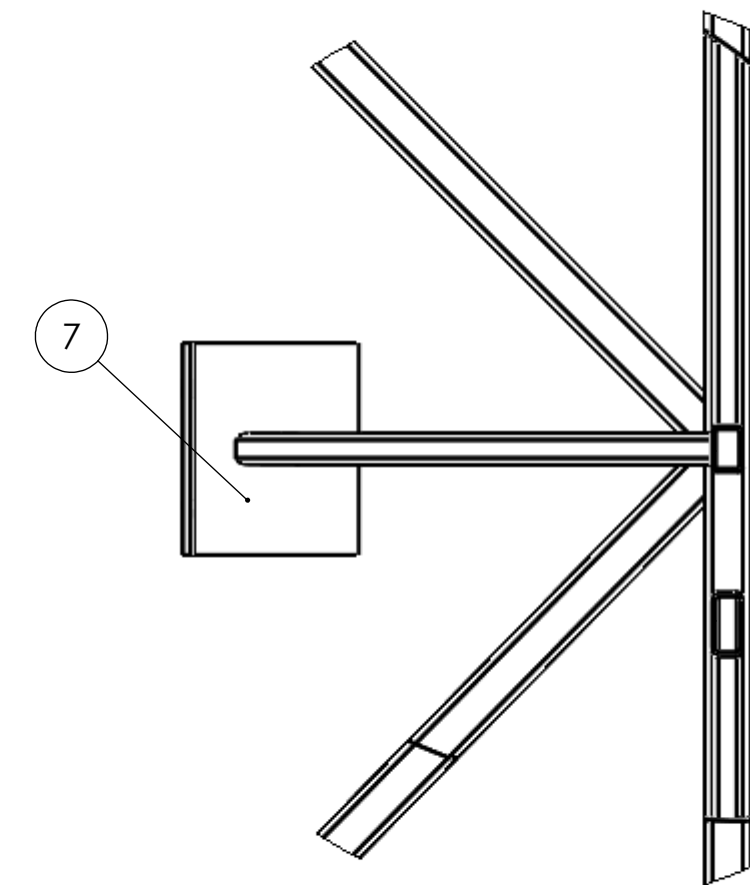
Detalj G  
Razmera 1:5



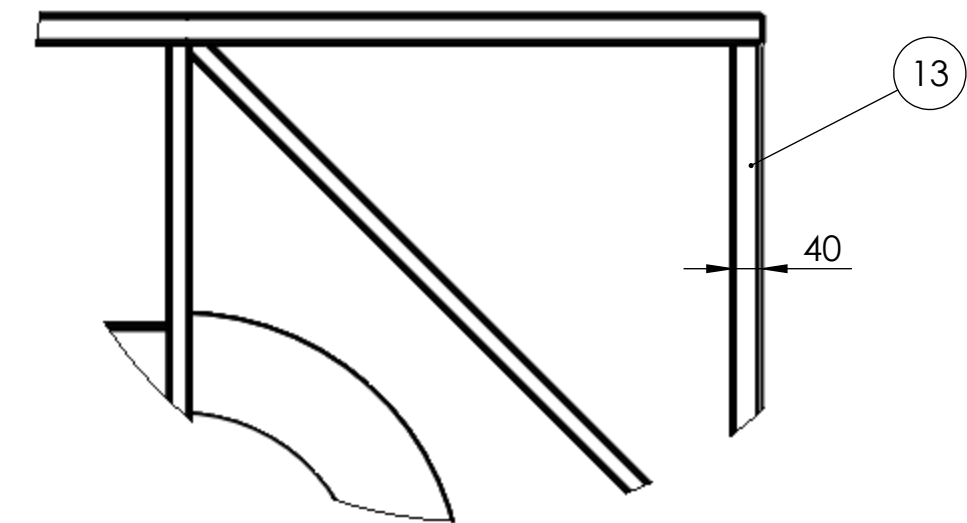
Detalj D  
Razmera 1:5



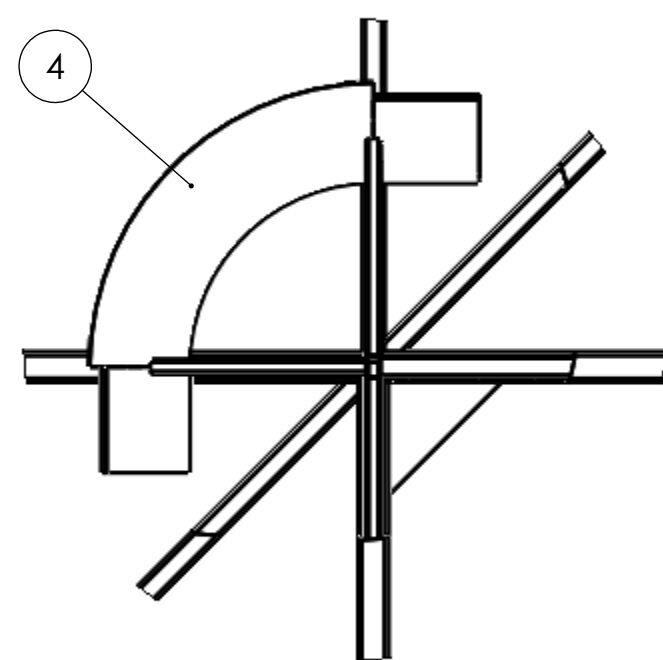
Detalj J  
Razmera 1:5



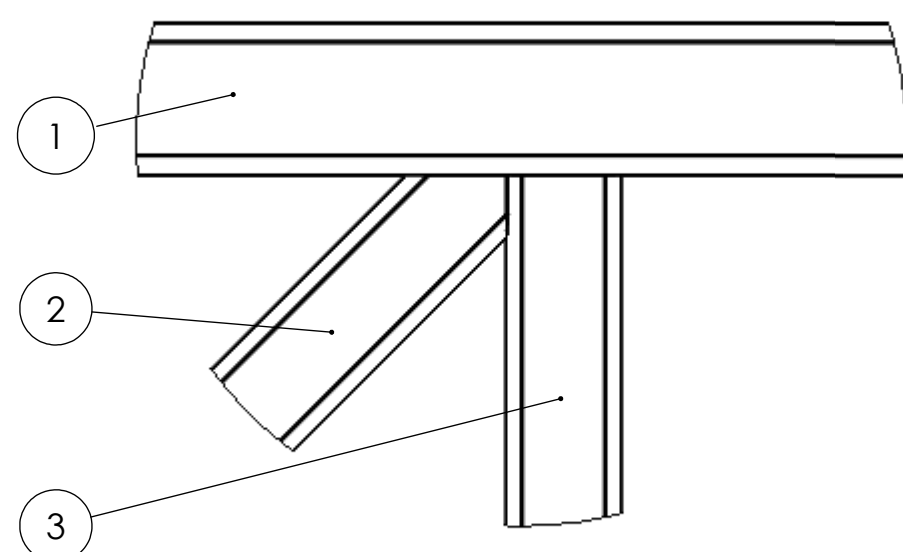
Detalj H  
Razmera 1:5



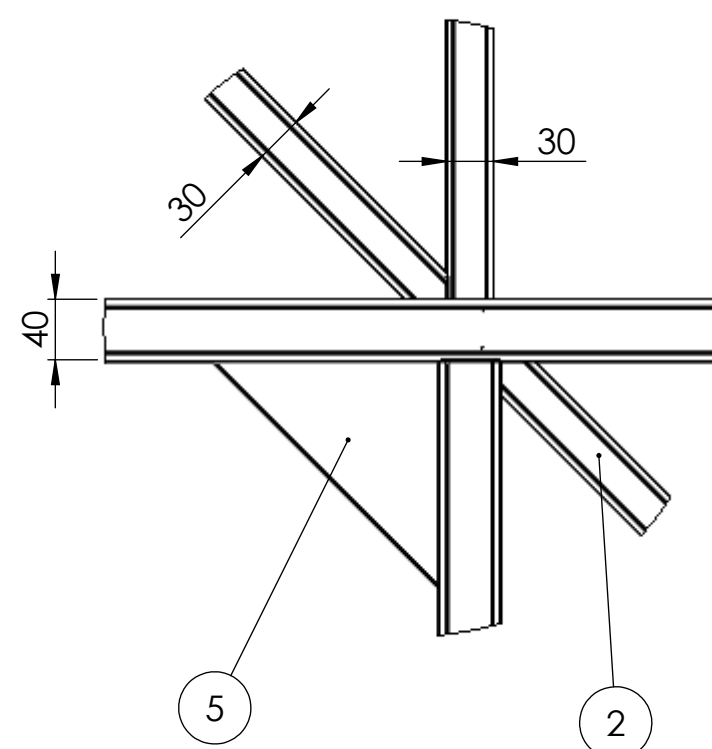
Detalj E  
Razmera 1:10



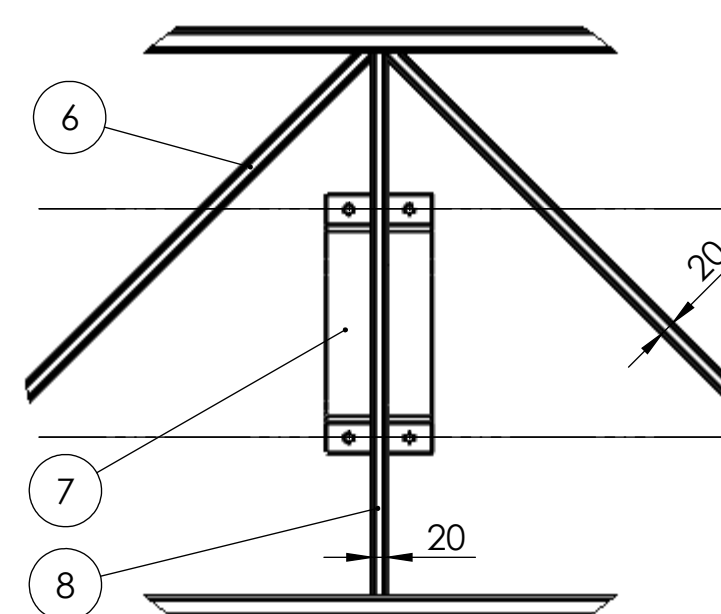
Detalj A  
Razmera 1:5



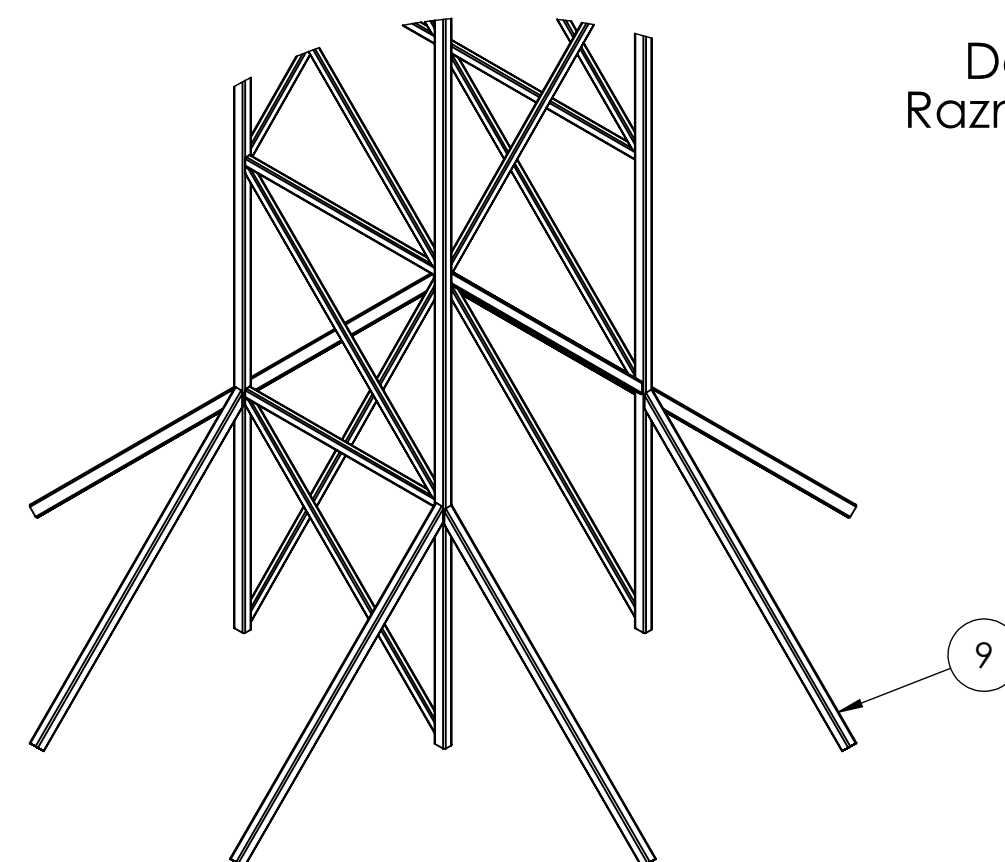
Detalj B  
Razmera 1:5



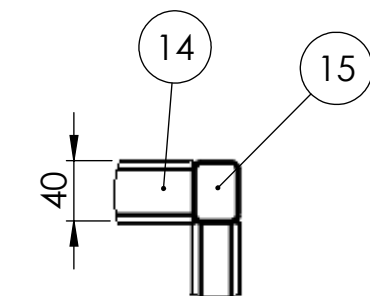
Detalj C  
Razmera 1:5



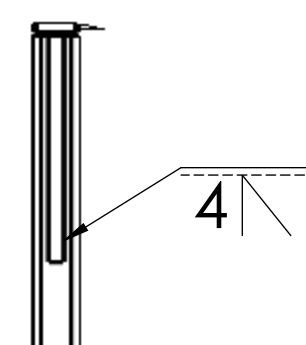
Detalj I  
Razmera 1:5



Detalj K  
Razmera 1:20



Detalj L  
Razmera 1:5



Detalj M  
Razmera 1:5

**Napomena:** Ne postoje zasebni crteži za trouglasti lim i zaštitnu pločicu. Zaštitnu pločicu napraviti na licu mesta.  
**Napomena:** Debljine svih zavarenih spojeva iznose 4 mm, osim ukoliko nije drugačije naznačeno.

| Tolerancije slobodnih mera |  | Površinska hrapavost                     |  | Površinska zaštita:     |  |
|----------------------------|--|------------------------------------------|--|-------------------------|--|
| Materijal:                 |  | Terminski obrada:                        |  | Naziv:                  |  |
| St. i. Izmene              |  | Datum                                    |  | Masa                    |  |
|                            |  | 05.07.2017.                              |  | 905.99 kg               |  |
|                            |  | Obradio                                  |  | Razmera                 |  |
|                            |  | Nenad Nikolić                            |  | 1:50                    |  |
|                            |  | Crtao                                    |  | Rešetkasta konstrukcija |  |
|                            |  | Overio                                   |  | Oznaka:                 |  |
|                            |  | Fakultet Inženjerskih nauka u Kragujevcu |  | Lst:                    |  |
|                            |  |                                          |  | L                       |  |
|                            |  |                                          |  | Izv. pod.               |  |
|                            |  |                                          |  | Zamena za:              |  |

|    |                           |     |
|----|---------------------------|-----|
| 15 | Zaštitna pločica          | 8   |
| 14 | Poprečna ispuna 2         | 4   |
| 13 | Vertikalna ispuna 2       | 4   |
| 12 | Dijagonalna ispuna 3      | 40  |
| 11 | Horizontalna ispuna 56    |     |
| 10 | Vertikalni pojas          | 8   |
| 9  | Profil oslonca rešetke    | 16  |
| 8  | Poprečna ispuna 1         | 20  |
| 7  | Oslonac cevi              | 20  |
| 6  | Dijagonalna ispuna 3      | 40  |
| 5  | Trouglasti lim 150x150x10 | 8   |
| 4  | Bočni nosač               | 2   |
| 3  | Vertikalna ispuna 1       | 94  |
| 2  | Dijagonalna ispuna 1      | 100 |
| 1  | Horizontalni pojas        | 4   |