Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Машинске конструкције и механизација

Предмет: Ливене и заварене конструкције

Број индекса: 352/2014

Милан Ж. Драгутиновић

Коришћење софтверског пакета TOWER за решавање проблема носача

- мастер рад -

Комисија за преглед и одбрану:

1. **Др Иван Милетић, доцент - ментор**
2. _____
3. _____

Датум одбране:_____

Оцена:_____

У оквиру овог мастер рада кандидат треба да обради следеће теме:

- ПОДЕЛА РЕШЕТКАСТИХ НОСАЧА СА ПОСЕБНИМ ОСВРТОМ НА РАВАНСКЕ РЕШЕТКЕ,
- РЕШАВАЊЕ ПРОБЛЕМА РЕШЕТКАСТИХ НОСАЧА АНАЛИТИЧКИМ ПУТЕМ,
- РЕШАВАЊЕ ПРОБЛЕМА РЕШЕТКАСТИХ НОСАЧА КОРИШЋЕЊЕМ ПРОГРАМСКОГ ПАКЕТА TOWER,
- ОДРЕЂИВАЊЕ НОСИВОСТИ ЗАВАРЕНИХ СПОЈЕВА ПРИМЕНОМ ЕУРОКОДА
- ПРИМЕР ПРИМЕНЕ ПРОГРАМСКОГ ПАКЕТА TOWER НА РЕШАВАЊЕ КОНКРЕТНОГ ПРОБЛЕМА.

Препоручена литература:

[1] С.П.Тимошенко, Д.Х.Јанг, Теорија конструкција, Грађевинска књига,Београд 1968,

[2] М.Ђурић, О. Ђурић-Перић, Статика конструкција, Грађевинска књига а.д. Београд 2007

[3] Еврокод *ЕС* 1993-1-1:2005, Грађевински факултет Универзитета у Београду, Јун 2017.

Крагујевац,Јун 2017

ментор:
Др Иван Милетић

_____

Резиме:

У овом раду су изложени аспекти решеткастих носаче, њихову поделу и примену.

У првом делу рада обрадили смо поделу решетки, обраду примењивих метода за израчунавање решеткастих носача.

Други део рада обрадио сам пример решеткасте конструкције аналитичким путем, али сама сврха је били да то преставимо нумеричким путем тј. у софтерском програму TOWER, где смо обрадили решеткасту конструкицију која се простире преко реке. Кроз софтерски програм TOWER обрадили смо анализу сила и оптерећења које нам је потребно за димензионисање решетке.

У трећем делу смо обрадили прорачун заварених спојева њену примену на решеткастим носачима.

Кључне речи: решеткасти носачи, заварени спојеви, TOWER.

Abstract

In this paper the aspects of the lattice of the carriers, their division and application are presented.

In the first part of the work we have worked on the division of the grids, processing of the applicable methods for calculating the lattice carriers.

The second part of the work I dealt with an example of a lattice structure analytically, but the very purpose was to move it by numerical means, i.e. In the TOWER software program, where we have processed a lattice structure extending across the river. Through the TOWER software program, we analyzed the force and load analysis we need to dimension the grille.

In the third part, we processed the calculation of welded joints for its application on lattice carriers.

.

Key words: the lattice of the carriers, welded joints, TOWER

Изјављујем да овај мастер рад продукт мог самосталног рада и знања, а уз коришћење искуства и наведене литературе.

Милан Драгутиновић

_____

САДРЖАЈ:

1. УВОД 1
2. РЕШЕТКАСТИ НОСАЧИ 2
2.1. Подела и примери решеткастих носача 2
3. РЕШАВАЊЕ ПРОБЛЕМА РАВАНСКИХ РЕШЕТКАСТИХ НОСАЧА 7
3.1. Аналитичко решавање проблема 7
3.1.1 Статички одређени носачи 7
3.1.2. Графички поступци одређивања сила у штаповима 8
3.1.2.1. Метода чворова 8
3.1.2.2. Maxwell-Cremonin план сила 9
3.1.2.3. Методе пресека 9
3.1.3. Статички неодређени носачи 10
3.2 Нумеричко решавање проблема 13
3.2.1. Метода коначних елемената 13
3.2.1.1. Оптерећење 15
3.2.1.2. Примена метода коначних елемената 15
3.3. Примена специјализованих софтера за решавање проблема 17
4. ПРОРАЧУН ЗАВАРЕНИХ СПОЈЕВА 18
4.1. Опште одредбе 18
5. СОФТЕРСКИ ПАКЕТ TOWER 7 19
5.1.Основне могућности 19
5.2 Графички интерфејс 20
5.3. Обрада резултата прорачуна 20
5.4. Приказивање поступка рада у софтеру 22
6. ПРИМЕР 28
6.1. Аналитичко решавање 28
6.1.1 Одређивање дејстава 29
6.1.1.1. Одређивање дејства снега, цеви, воде у цеви и решеткасте конструкције 29
6.1.2. Прорачун хоризонталног дела решетке 30
6.1.2.1. Одређивање отпора ослонаца 30
6.1.2.2. Одређивање сила у штаповима решетке 31
6.2. Димензионисање штапова 35
6.3. Одређивање угиба решетке 39
6.3. Прорачун штапова који спајају раванске решетке 44
6.4. Решавање примера софтерским програмом TOWER 46

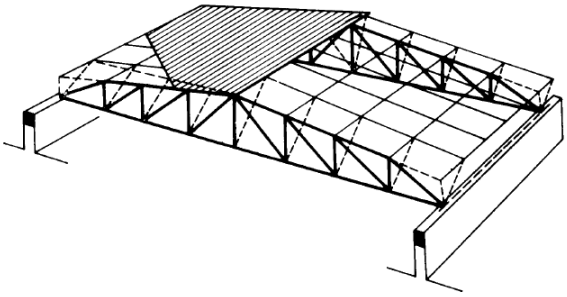
6.4.1. Приказивање поступка рада у софтеру 46
6.4.2 Обрађени подаци u TOWER-y 53
6.4.2.1. Просторна решетка 53
6.4.2.2. Раванска решетка 55
6.5. Прорачун заварених спојева 57
7. ЗАКЉУЧАК 59
ЛИТЕРАТУРА 60

1. УВОД

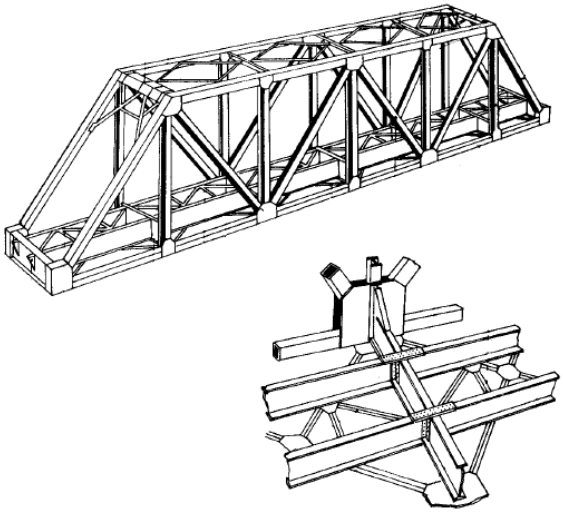
Решеткасти носачи су инжењерске конструкције настале са циљем да се олакшају конструкције направљене од пуног материјала. Говорећи уопште, она се може дефинисати као систем штапова, која леже у једној или више равни или простору, а међусобно су спојени својим крајевима, тако да стварају крут оквир[1].
Основне карактеристике решеткастих носача:

- Састоје се од међусобно повезаних аксијално оптерећених штапова;
- Момент савијања преноси се напрезанем појасних штапова, а утицај трансверзалних сила преузимају штапови испуне;
- Боље искоришћење матријала (константна расподела напона)
- Мања тежина у односу на пуне носаче;
- Могућност премошћавања великих распона;
- Транспарентнст и могућност провођења инсталација;
- Компликованија израда у односу на пуне носаче;

Највећа промена решеткастих носача има у зградарству и мостоградњи, као што су ковни решеткасти носачи приказани на слици 1.1 и решеткасти носачи код желеничког моста на слици 1.2.



Слика 1.1 – Кровни решеткасти носач



Слика 1.2. Решеткасти носач код железничког моста

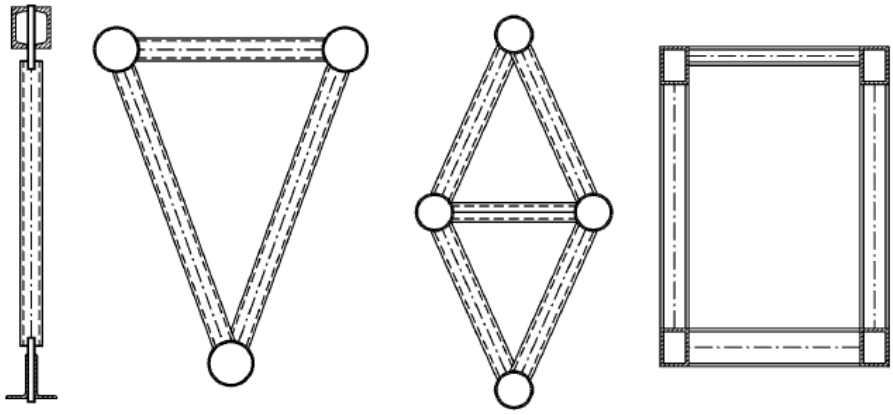
2. РЕШЕТКАСТИ НОСАЧИ

2.1. Подела и примери решеткастих носача

Решеткастих носача могу поделити према:

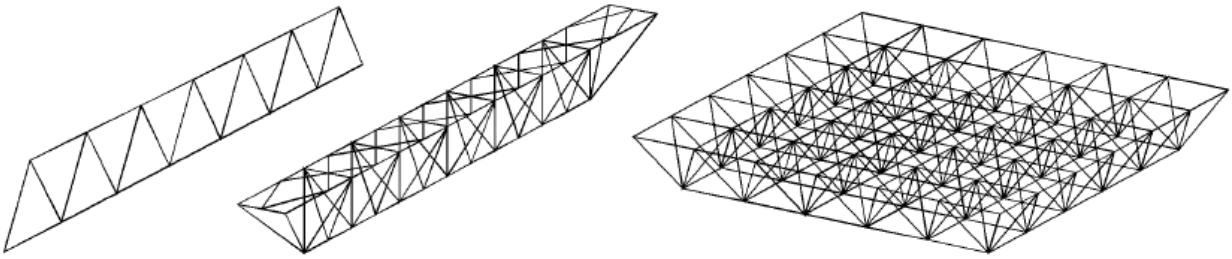
- Према броју појасева,
- Према просторном облику,
- Према интензитету оптерећења и
- Према обликовању чворова.

Према броју појасева решеткасти носачи могу бити двопојасни или вишепојасни (тропојасни, четворопојасни...) што је приказано на слици 2.1.



Слика 2.1. Примери двопојасних и вишепојасних ресетки

Према просторном облику решеткасте конструкције, могу бити просторне и равнинске, важне су инжењерске носиве конструкције. Основни носиви елементи ових конструкција су равни штапови који су на крајевима зглобно повезани у чворове. Властита тежина штапова се у прорачуну занемарује или се распоређује као оптерећење на чворове. Спољашње оптерећење решеткасте конструкције преузима се само преко чворова. Према томе, сваки штап решеткасте конструкције може бити оптерећен на својим крајевима само силом везе штапа и чвора. Другим ријечима, сваки штап је аксијално оптерећен. Дакле, прорачун решеткасте конструкције се своди на одређивање сила у штаповима конструкције. На слици 2.2 приказан је пример просторне и раванске решетке.



Слика 2.2. Примери порсторних и раванских решетки

Просторне решеткасте конструкције су оне код којих штапови не леже у истој равнини, већ су смештени у простору. Такође, спољашње силе које делују у чворовима имају општу оријентацију.

Равнински решеткасти носачи су равнинске решеткасте конструкције код којих сви штапови и све спољашње силе леже у истој равнини. Код статички одређених решеткастих носача могуће је одредити силе у свим штаповима за било које оптерећење носача помоћу једначине равнотеже статике крутог тела. На сликама 2.3 - 2.7 приказани су примери где све могу да се користе раванске и просторне решетке.

Слика 2.3. Решеткасти кровни носачи

Слика 2.4. Чаотианмен мост у Чонгкингу са распоном од 552 метара је сада највећи мост са лучним распоном на свету

Слика 2.5. Кровни решеткасти носачи

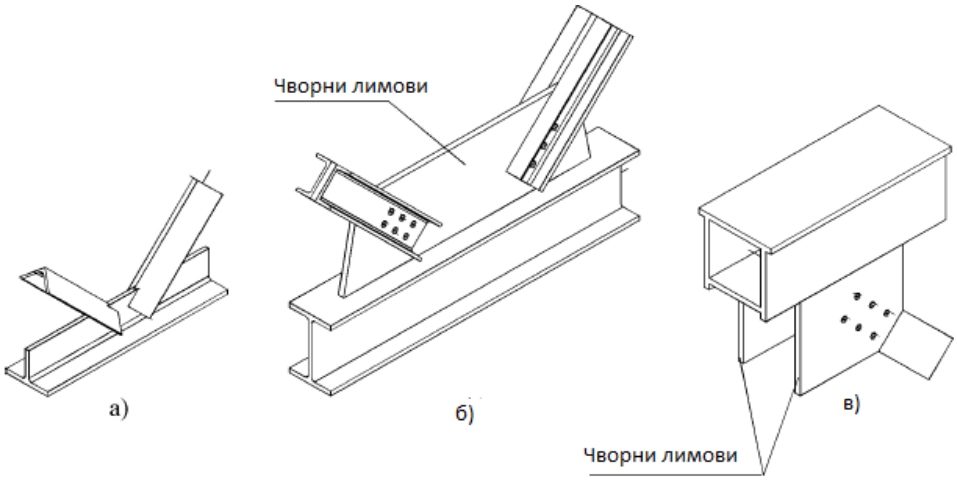
Слика 2.6. Олимпијски стадион у Пекингу познат по имену " Птичије гнездо "

Слика 2.7. Кровни носачи великог распона

За одређивање сила у штаповима носача постоје аналитички и графички поступци.

Према интензитету оптерећења решеткасти носачи који су престављени на слици 2.8 деле се на:

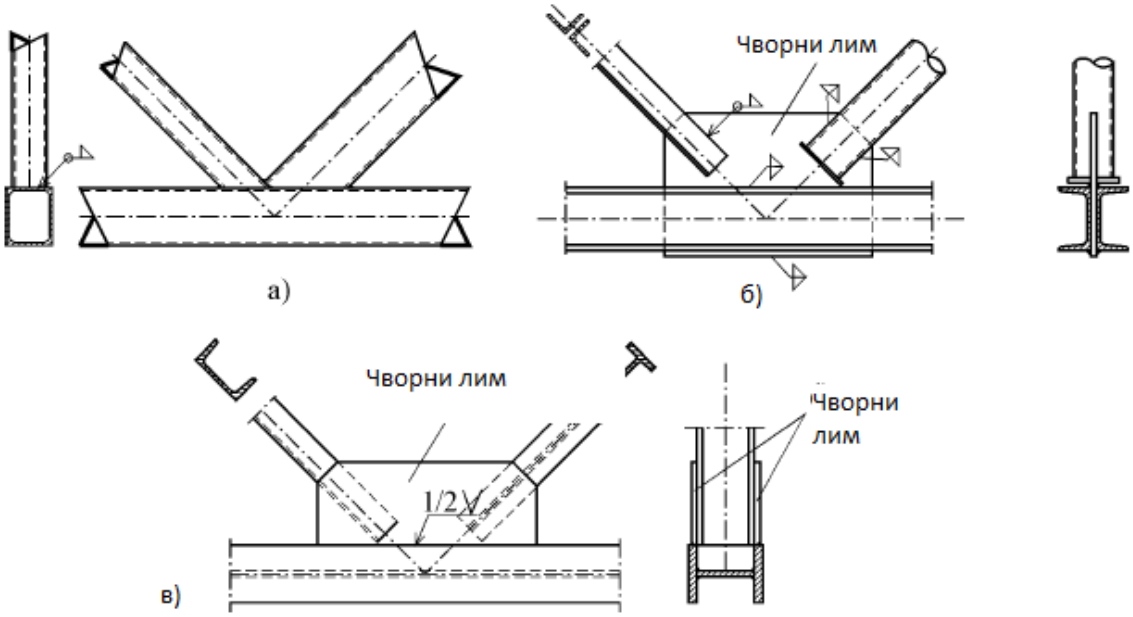
- Лаки решеткасти носачи;
- Средње тешки решеткасти носачи и
- Тешки решеткасти носачи.



Слика 2.8 а) Лаки ресеткасти носач, б) Средње тешки решеткасти носачи, в) Тешки решеткасти носачи

Према начину обликовања чворова решеткасти носачи који су представљени на слици 2.9 могу бити:

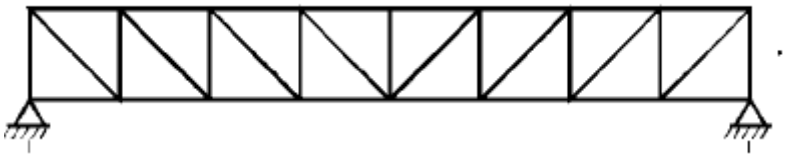
- Решеткасти носачи без чворних лимова;
- Рештласти носачи са чворним лимовима:
  1. у једној равни (једно зидни решеткасти носачи)
  2. у две паралелне равни (двозидни решеткасти носачи)



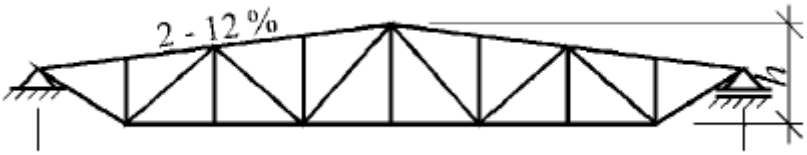
Слика 2.9. а) Решеткасти носачи без чворних лимова; б) једно зидни решеткасти носачи в) двозидни решеткасти носачи

Облик решеткастог носача зависи од облика појасних штапова решеткасти носачи могу бити са:

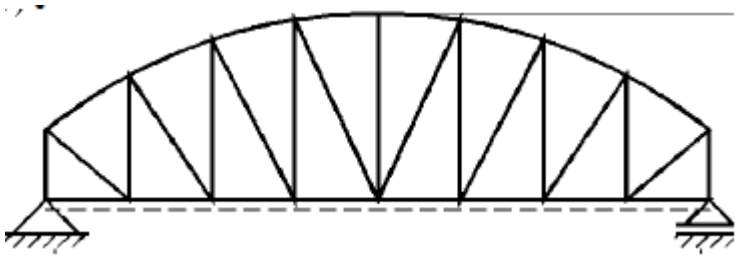
- паралелним појасевима (слика 2.10);
- горњим појасом у нагибу (нагиб кровне равни, слика 2.11),
    - Троугласти,
    - Трапезасти и полигонални,
- параболичним појасом или појасевима (слике 2.12 и 2.13).



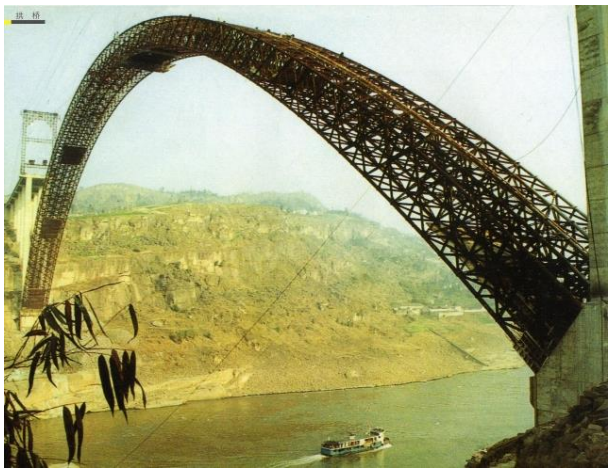
Слика 2.10. Решеткасти носач са паралелним појасном



Слика 2.11. Решеткасти носач са трапезасти и полигонални



Слика 2.12. Решеткасти носач са параболичним појасом или појасевима



Слика 2.13. Решеткасти носач са параболичним појасом на реци" Jinjiang"

3. РЕШАВАЊЕ ПРОБЛЕМА РАВАНСКИХ РЕШЕТКАСТИХ НОСАЧА

3.1. Аналитичко решавање проблема

Код аналитичког решавање проблема можемо да обрадимо следеће начине решавања раванских решеткастих носача и то су:

- Статички одређени носачи,
- Решеткасти носачи са зглобом и
- Статички неодређени.

3.1.1 Статички одређени носачи

Дефиницију статчки 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 $\Sigma_z = 2K$.

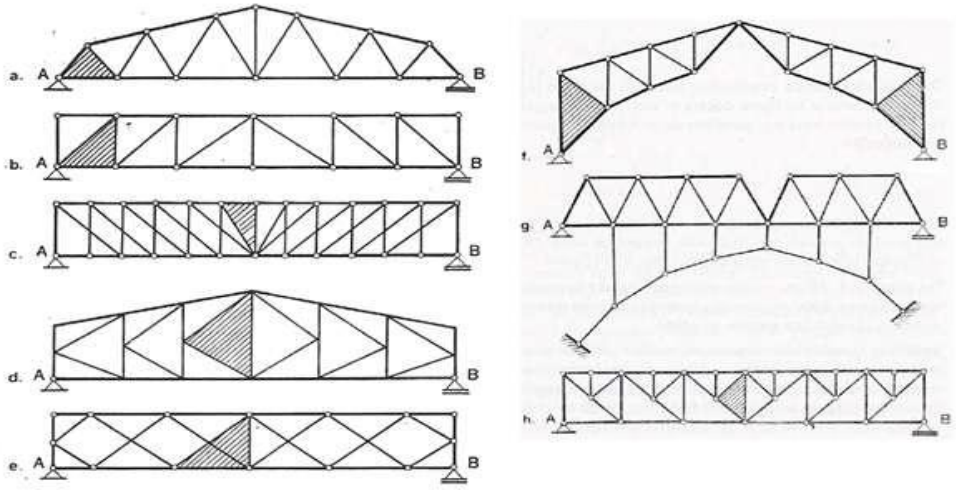
Носачи о којима је овде реч састоје се од штапова, међусобоно повезаних крутим угловима или згобовима. Ако би се неки статички одређени носач разложио тако што би се све зглобне везе раставиле, добили бисмо поједине групе стапова међусобно повезаних крутим угловима. Такве групе штапова називамо *гранама*[2].

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 стапова.

Свака кинематички просто стабилна односно статички одређена плоча састоји се од једне или висе злавкасто везаних грана[2].

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

На слици 3.1 приказано је неколико решеткастих носача са назначеним карактеристични троугловима (шрафирани троугао). Сви носачи се састоје од једног диска, осим носача на сликама 3.ф. и 3.г. који имају више од једног диска



Слика 3.1. Решеткасии носачи са назначеним карактеристичним троугловима.

Потребно је нагласити да сваки решеткасти систем није нужно и статички одређен носач. Само решеткасти систем који се састоји из довољног, али најмањега потребнога броја међусобно зглобно спојених штапова, исправно распоређених, те с довољним, али најмањим потребним бројем спољних веза, такође исправно распоређених, можемо звати статички одређеним решеткастим носачем. При томе се претпоставља да су сви штапови равни (незакривљени), константног попречног пресека и да спољашња оптерећења делују у чворовима и у равнини носача.

Исправан распоред штапова значи да носач задовољава нужан услов геометријске непромењивости решеткастог диска. Геометријску непромењивост решеткастог диска најлакше ћемо показати полазећи од најједноставније структуре решеткастог диска – троугла. Троугао је основна геометријски непромењива фигура састављена од три штапа и три чвора. Почевши од основног троугла поступним спајањем сваког новог чвора с два штапа, долази се до геометријски непромењивог решеткастог диска.

3.1.2. Графички поступци одређивања сила у штаповима

Код графичког одређивања сила у штаповима решеткастих носача посебно ћемо протумачити ове поступке:

a. Метода чворова,
b. *Maxwell-Cremonin* план сила,
c. Методе пресека и
d. *Culmannov* поступак.

Према типу решеткастог носача, као и циљу прорачуна, одабиремо најприкладнији графички поступак. Наиме, важно је знати да ли се траже силе у свим штаповима решеткастог носача или само у неким штаповима. Сваки од наведених поступака је, по својој природи, учинковитији од осталих поступака за одређени тип носача и циљ прорачуна. Ове методе су већ застареле, али се и даље пимењују у пракси, нарочито грађевинци.

3.1.2.1. Метода чворова

Основна замисао ове методе је да замишљамо како се из решеткастог носача изрезују поједини чворови на које се онда постављају услови равнотеже. Стога се ова метода још назива ″методом изрезивања чворова″ или ″методом равнотеже чворова″. Ова метода је најопштија и најједноставнија метода за одређивање сила у штаповима решеткастог носача. Будући да се све силе које делују на један чвор секу у једној тачки, могуће је поставити само две једначине равнотеже у том чвору - систем сучењних сила. Те две једначине можемо решити аналитичким поступком, али исто тако је из механике познато да те аналитичке услове равнотеже можемо заменити графичким.

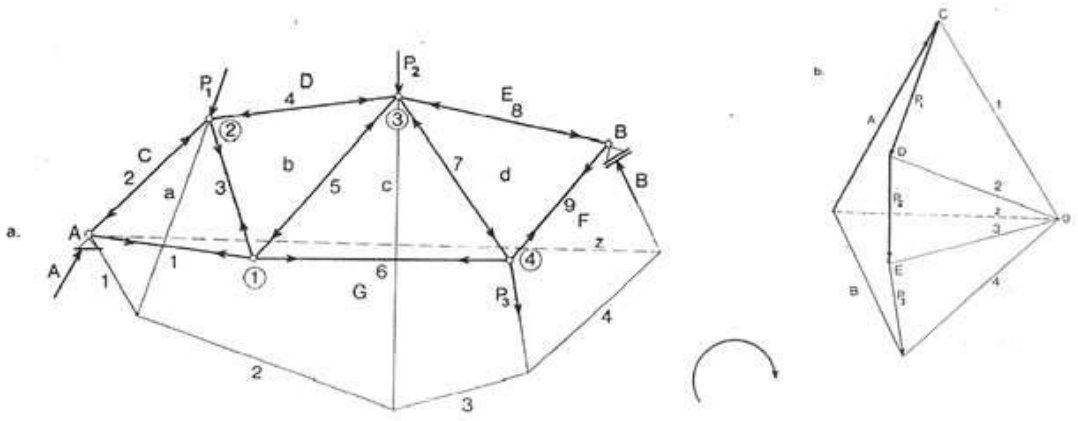
Код графичког поступка одређивања сила у штаповима важно је напоменути да је из равнотеже једног чвора графички могуће одредити само две непознате силе. Дакле, при одређивању сила у штаповима по овој методи треба полазити од чворова у којима су непознате само две силе. Како су сви чворови у равнотежи, односно све силе у тим чворовима су у равнотежи, јасно је да те силе затварају полигон сила у сваком чвору. Ти полигони сила могу се цртати независан за сваки чвор, али се мора водити рачуна да при цртању полигона сила за неки чвор у том чвору остају само две непознате силе које ће бити одређене из тог полигона. На тај начин, крећући се од чвора до чвора, можемо одредити силе у свим штаповима носача.

3.1.2.2. *Maxwell-Cremonin* план сила

Овај поступак је логичан наставак већ споменуте методе чворова. Односно, може се рећи да је овај поступак усавршена метода чворова где се свака сила појављује само једанпут, а сви полигони сила сложени су у јединствен план. Као такав, овај план сила пуно је прегледнији и мање подложан погрешкама у односу на графичку конструкцију методе чворова.

Овај поступак пронашао је 1864. године енглески физичар *J. C. Maxwell*. Независно од њега детаљно га је разрадио професор политехнике у Милану *L. Cremona* 1872. године. У континенталном делу Европе овај се поступак обично назива *Cremonovim* планом сила.

Пример решеткастог носач једноставне структуре (чија је геометријска непромењивост и статичка одређеност очигледна) оптерећен спољашњим силама како је приказано на слици 3.2.



Слика 3.2. Пример оптерећен спољашњим силама.

3.1.2.3. Методе пресека

Методе пресека су прикладне за одређивање сила само у неким штаповима решеткастог носача. Дакле, ове методе се примењују у случајевима када носач можемо пресеком поделити на два дела, тако да се пресеку само три штапа којима се правци не секу у истој тачки. Наравно, могуће је пресећи и више штапова, али међу њима несме бити више од три штапа с непознатим силама. Такође, пресеком је могуће издвојити један део носача, али опет под наведеним условом да имамо највише три штапа с непознатим силама. Код метода пресека један део носача се проматра, а други одбацује, при чему је јасно да је проматрани део носача у равнотежи под деловањем спољашњих сила које на њега делују и сила којима одбачени део делује на њега. За разлику од пуностених носача, где се у пресеку појављују момент савијања, попречна и уздужна сила, код решеткастих носача појављују се само силе у штаповима.

Из механике нам је познато да се из условима равнотеже сила у равни из једног пресека могу одредити највише три силе. Ако пресек има четири штапа, проблем је решив ако је сила у једном од тих штапова претходно одређена из неког другог пресека. Такође, може се догодити да у пресеку имамо више од три штапа у којима неке силе нису претходно одређене, односно све су непознате. И тада је проблем решив, али само онда када се правци свих пресечених штапова, осим једног, секу у истој тачки.

Методе пресека могу бити аналитичке, графичке и графоаналитичке. Сврха аналитичких метода је у томе да се постављају једначине равнотеже у којима имамо само једну непознату силу.

Графичке методе се темеље на истим принципима као и аналитичке, односно може се рећи да су то геометријске интерпретације једначине равнотеже.

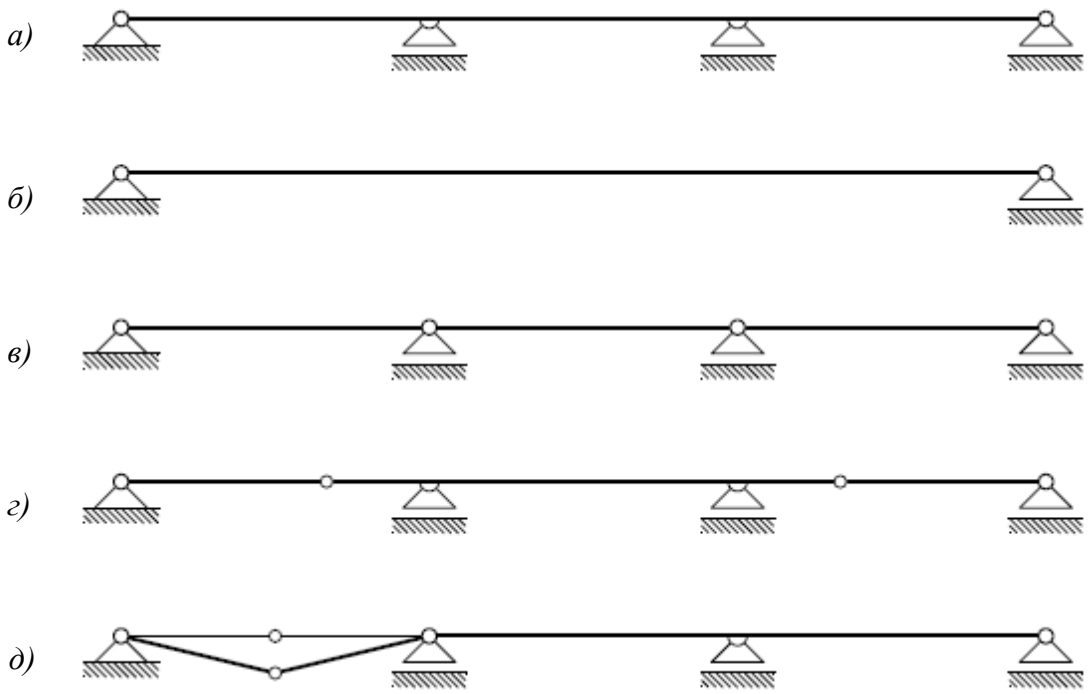
3.1.3. Статички неодређени носачи

Статитчки неодређени систем је спојени систем који може остати у стању равнотеже при било каквом оптерећењу, али је број непознатих вредности сила у везама, спољашњим или унутарашњим или и спољашњим 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 неодредени систем геометријски непромењиви систем у којем је број веза, спољним или унутарашњим или једних и других, већи од најмањега броја дозвољених за његову геометријску непромењивост.

Статички неодређеним носачима назвају се насачи у којима реакције ослонаца, момента укљештења и силе у пресецима не могу да се одреде само из услова равнотеже тог носача[3].

На слици 3.3.а. приказан је континуирани носач преко три поља тј. четири лежаја. Тај је носач (као равнинска конструкција) два пута статички неодређени има пет непознатих реакција, а у равни се могу поставити само три независне једначине равнотеже. Лако је видети и да са, кинематичког гредишта, носачи има две прекобројне везе. Уклонимо други и трећи лежај, добићемо просту греду (слика б.). Прекобројнима можемо сматрати и унутаршње везе: убацимо ли у пресек над другим и трећим лежајем зглобове претворимо ли, другим речима, круте веза, које преносе све три унутрашње силе, у зглобне, које не преносе моменте савијања настатаће низ простих греда (слика в.). Или додавањем зглобова у два пресека у првом и трећем пољу настаје Герберов носач (слика д.).



Слика 3.3. Гредни носчи

Решеткасти носач код којих је $z_0 + z_s > 2K$ статички су неодређени. Када се узме у обзир да код решеткастих носача нема укљештења, нити крутих углова. Број статичке неодређености решеткастог носача је дефинисан са

$$n = z_0 + z_s - 2K\,, \tag{3.1}$$

За решавање статички неодређених решеткастих носача по методи сила важи исти систем једначина, који је изведен за општи случај носача:

$$\begin{aligned}
&X_1\delta_{11} + X_2\delta_{12} + \cdots X_n\delta_{1n} + \delta_{10} = 0\\
&X_1\delta_{21} + X_2\delta_{22} + \cdots X_n\delta_{2n} + \delta_{20} = 0\\
&\ldots\ldots\ldots\ldots\\
&\ldots\ldots\ldots\ldots\\
&X_1\delta_{n1} + X_2\delta_{n2} + \cdots X_n\delta_{nn} + \delta_{n0} = 0
\end{aligned} \tag{3.2}$$

Коефицијент δ_{ik} у овим једначинама се овде рачунају према изразима

$$\begin{aligned}
\delta_{ik} &= \sum_s \frac{S_i S_k}{EF} l\\
\delta_{i0} &= \sum_s \frac{S_i S_0}{EF} l
\end{aligned} \tag{3.3}$$

у којима S_i, S_k и S_0 означавају силе у штаповима за стање $X_i = 1$, $X_k = 1$ и $X_i = 0$ респективно.

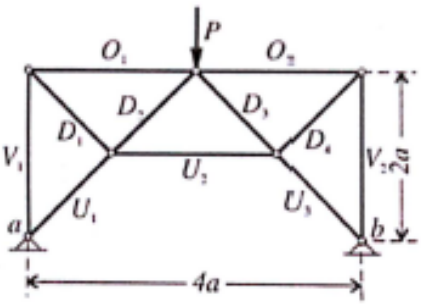
После срачунавања непознатих Xi , реакције ослонаца, силе у штаповима и померања се израчунавају применом принципа суперпозиције:

$$Z = Z_0 + \sum_{i=1}^{n} Z_i X_i, \tag{3.4}$$

где је:

Z означена тражена велична,
Z_0 – величина за стање $Xi = 0$,
Z_i – величина за стање $X_i = 1$.

За илустрацију биће приказан једноставан нумерички пример. На слици 3.4 видимо један решеткасти носач, који је једанпут статистички неодређен. Код свих штапова је *EF* исто.



Слика 3.4. Пример статички неодређене решетке

Основни систем ћемо добити тако што у тачки b избацује хоризонатлан ослонац. Тако се добија носач који је приказан на слици 3.4. Решавајући тај носач за стање $X_1 = 1$ и $X_1 = 0$ на било који од познатих начина добићемо реакцију ослонца силе у стаповима.

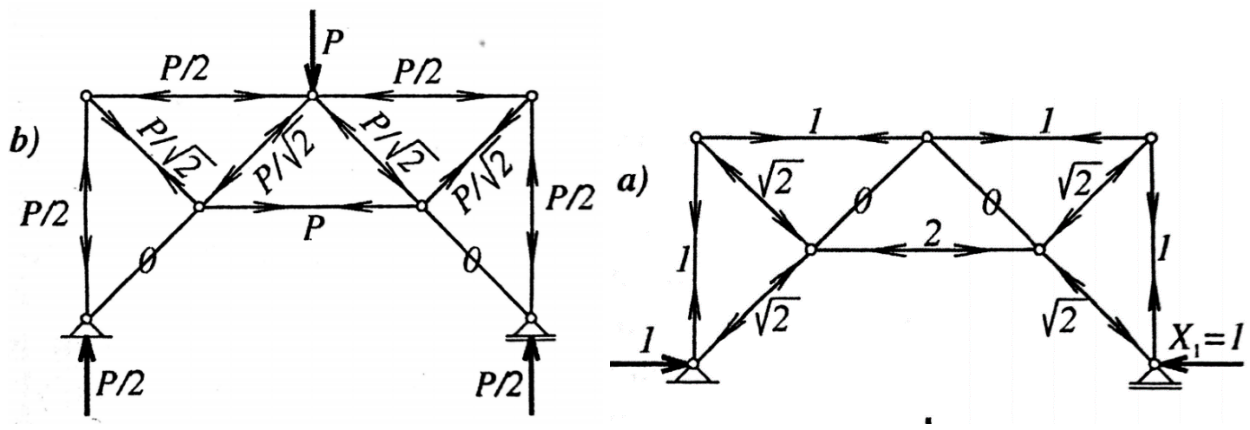
На слици 3.5.а) су дати резултати стања $X_1 = 1$. Поред свакога штапа уписана је одговарајућа вредност силе у њему. Стрелицама је означен смер силе штапа: ако је затегнут, у супротно он је претиснут. Преко штапова који нису оптерећени (*нула-штапови*) написана нула.

Резултати за стање $X_1 = 0$ видимо на слици 3.5. б. Начин означавања је исто као за за претхони случај. Потребни коефицијенти за једначину $X_1\delta_{11} + \delta_{10} = 0$ су:

$$\begin{aligned} EF\delta_{11} &= \sum S_{1i}^2 l_i = 8a\left(2+\sqrt{2}\right) \\ EF\delta_{10} &= \sum S_{1i}^2 S_{0i} = -2a\left(4+\sqrt{2}\right) \end{aligned} \tag{3.5}$$

На основу тога се добија:

$$X_1 = \frac{\delta_{10}}{\delta_{11}} = \frac{P}{4} \cdot \frac{4+\sqrt{2}}{2+\sqrt{2}} \approx 0{,}396P. \tag{3.6}$$



Слика 3.4. а) Стања $X_1 = 1$ и $X_1 = 0$; б). Стања $X_1 = 1$ и $X_1 = 0$.

3.2 Нумеричко решавање проблема

Диференцијалне једначине које описују стање напона и стање деформација тела сложених геометрија, структура или контурних услова решавају се приближним нумеричким методама.

Добијена решења су приближна, али могу бити увек довољно блиска тачном решењу онолико колико се у датом проблему жели.

- I приступ (*Нумеричко интегаљење, Метода коначних разлика*): Дискретизација се врши тек у математичком моделу.
- II приступ (*Метода коначних елемената - МКЕ*): Дискретизација се врши у физичком моделу.

3.2.1. Метода коначних елемената

Метод коначних елемената представља нумерички поступак рјешавања инжењерских проблема и проблема математичке физике. Могу да га користе све врсте инжењера, дизајнери и менаџери[5].

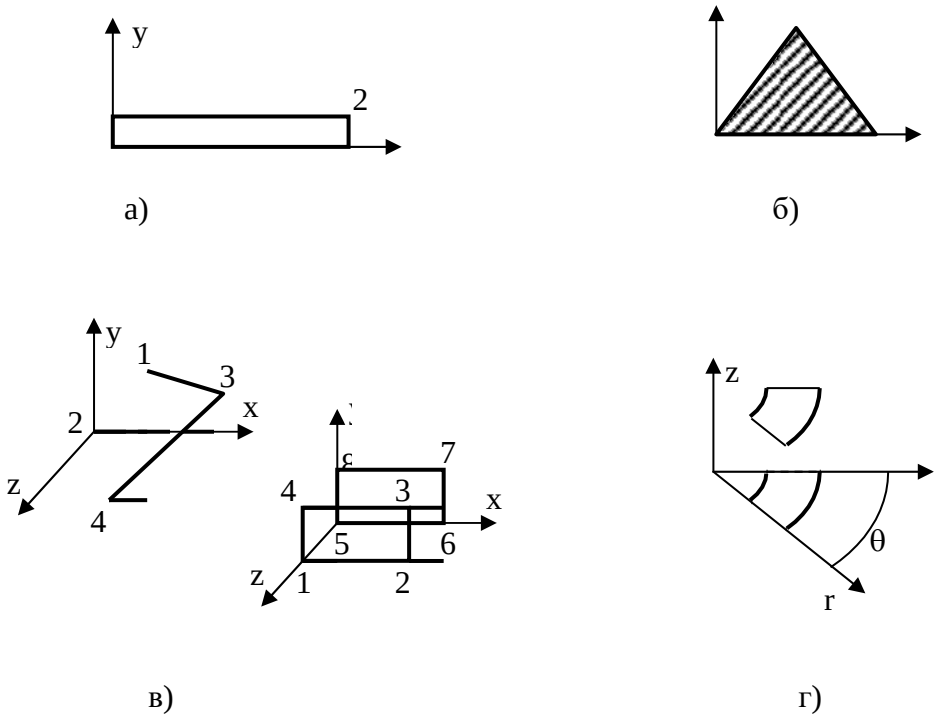
Методом коначних елемената врши се анализа структура, рачунају температурна поља, ток флуида, транспорт маса итд.

У највећем броју случајева када анализирана структура има сложену геометрију, када је сложено оптерећење и када су структуре од различитих материјала, није могуће наћи решење у аналитичком облику. Аналитичко решење подразумева добивање аналитичких израза за рачунање тражених карактеристика на различитим местима структуре (померање, температура, напон и сл.). За добивање таквих података треба решавати диференцијалне или парцијалне диференцијалне једначине. То је могуће урадити само за врло једноставне проблеме. За сложену геометрију и сложено оптерећење није могуће наћи решења у аналитичком облику. Због тога се користе нумерички методи, а један од њих, најчешће кориштен је метод коначних елемената (МКЕ). Решавање проблема методом коначних елемената своди се на решавање система алгебарских једначина.

Ранија примена МКЕ односила се само на структуралну механику да би се касније проширила на решавање проблема преноса топлоте, електростатички потенцијал, механику флуида, вибрациону анализу и разне друге проблеме у машинству. Данас се развијају софтери у подручју бризгања пластике који су у могућности да покажу дистрибуцију температурног поља и пуњење калупа течном масом. MOLDFLOW, C-MOLD су софтери који симулирају ток течне пластике код бризгања пластике.

У развоју електромашинства, нуклеарне технике, магнетизма и за анализе токова флуида, симулацију нелинеарних проблема користе се суперрачунари (као што је CRAY).

Избор елемента који се користи у МКЕ анализи зависи од проблема који се решава и од жељене тачности резултата. Прво о чему треба водити рачуна односи се на чињеницу да ли је проблем једно, дво или тродимензионалан. Ако се ради о просторним или раванским решеткама онда се користе линијски или једнодимензионални елементи. Ако је проблем равански користе се дводимензионални равански елементи, а ако је проблем просторни користе се тродимензионални елементи[5]. Неки елементи су приказани на слици 3.6.



Слика 3.5. а) једнодимензионални елементи, б) дводимензопни елементи, в) тродимензионални елементи, г) осносиметрични елементи

3.2.1.1. Оптерећење

У МКЕ се могу користити различите врсте оптерећења. У структуралној анализи оптерећење делује у чворовима. Дистрибуирано оптерећење и почетне деформације могу бити нанесени на једнодимензионалне елементе, деловање притиска на дво и тродимензионалне елементе, сила притиска на дво и тродимензионалне елементе, сила гравитације, центрифугална сила и термално оптерећење.

- ***Директно оптерећење***

Силе и моменти могу се наносити директно у чворним тачкама дискретизоване структуре. Правац нанесених сила и момената дефинише се са три међусобно вертикалне компоненте у координатном систему.

- ***Континуирано оптерећење***

Континуирано оптерећење може бити распоређено по дужини једнодимензионог елемента или по површинама дво или тродимензионалних елемената.

- ***Гравитационо и центрифугално оптерећење***

Гравитационо оптерећење потиче од властите тежине тј. убрзања гравитације или неког другог равномерног убрзања.

- ***Термално оптерећење***

Општи облик термалног оптерећења представљају температуре и термални коефицијенти ширења. Другим подацима могу се дефинирати средња температура или температурни градијенти по дужини или кроз попречни пресек и дебљину дво или тродимензионалних елемената.

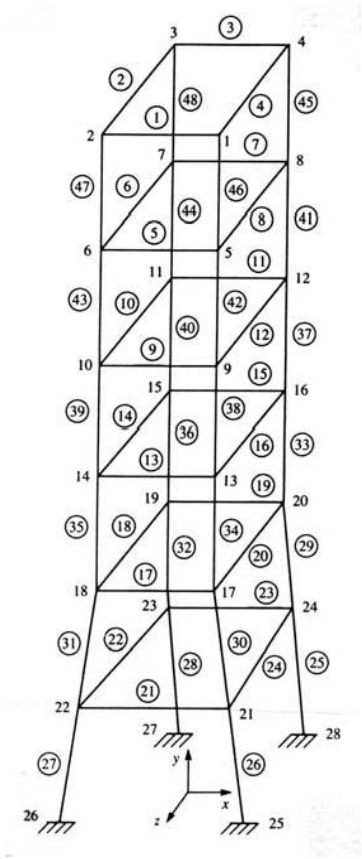
- ***Динамичко оптерећење***

Принудно оптерећење је временски променљиво директно оптерећење које делује у чворовима или је дистрибуирано по елементу исто као у статичкој анализи. Оно се уноси у прорачун као хармонијска функција. Принудно убрзање, брзина и померање су резултат улазних временски променљивих карактеристика брзине, убрзања и померања чворних тачака.

3.2.1.2. Примена метода коначних елемената

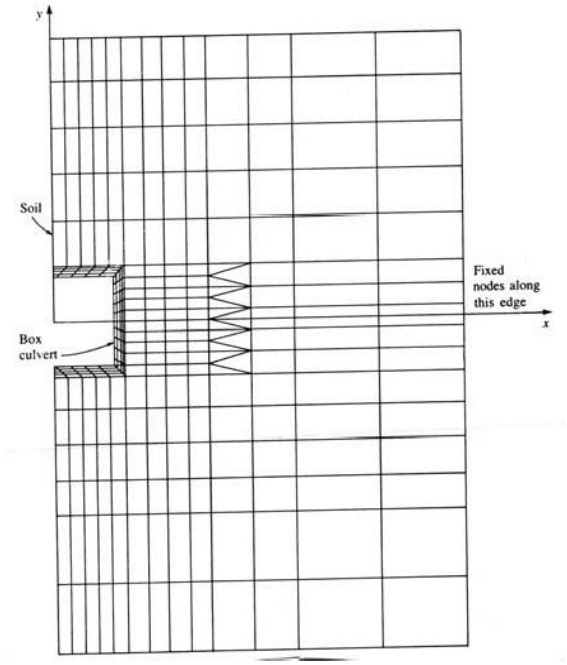
Методом коначних елемената могу се решавати проблеми структурне анализе. У оквиру тог постоје статички и динамички проблеми[5].

Типични статички проблеми су рачунање деформационо-напонског стања структуре. Један пример просторне решетке дат је на слици 3.6. Решетка се састоји од 48 штапова који су повезани са 28 чворова. Сви чворови осим оних у ослонцима имају по три степена слободе, тј. да се померају у простору.



Слика 3.6. - Торањска решетка

У случају дводимензионалних проблема, какав је пример на слици 3.7. анализиран је случај плоче са отвором. С обзиром на симетричност у односу на осу анализира се само половина плоче. Модел се састоји од елемената који су већи што су удаљенији од отвора, а ситнији што су ближе рупи где је концентрација напона већа, слика 3.7.



Слика 3.7. – Плоча са отвором

У општем случају матрична једначина у структурној анализи има облик:

$$[M]\{\ddot{d}\}+[B]\{\dot{d}\}+[K]\{d\}=\{F\}+\{N\} \tag{3.7}$$

Где су :

[M], [B] и [K] матрице маса пригушења и крутости,

$\{\ddot{d}\}$, $\{\dot{d}\}$ и $\{d\}$ вектори убрзања , брзине и померања,

{F} и {N} – бектори статичких динамичких оптерећења.

Такође је $[K] = [K_E] + [K_G]$

Где је:

$[K_E]$- еластична крутост,

$[K_G]$ – геометријска или диференцијална крутост.

$$[K]\ \{d\} = \{F\} \tag{3.8}$$

3.3. Примена специјализованих софтера за решавање проблема

У модерном конструкционом машинству користе се различити компјутерски софтери CAE (Computer Aided Engineering) како би се оценила конструкција у сваком кораку у процесу дизајнирања. CAE алати се користе за анализе кинематичких или динамичких карактеристика конструкције. На тржишту постоји низ моћних CAD (*Computer Aided Desing*) софтерских алата. Први програми нису имали могућност визуализације и даље су се развијали и добили нове верзије NASTRAN, SAP до ABAQUS ANCYC, IDEAS, FLOW, CATIA, ALGOR, FEMAP итд. Софтери су се развијали зависно од подручја за које су намењени или за универзалну примену (статичку, динамичку, термичку анализу)[5].

CAD даје следеће предности пројектовању:

- виши ниво квалитета (тачност, финоћа),
- реализује најобимније задатке и ослобађање човека рутинског посла,
- визуелну интерпретацију форме која омогућује пре израде, оцену функционалних и естетских вредности производа,
- омогућава специфичне анализе (прорачуни локалних напона код брзих процеса и сложених структура) из чега следи побољшање склопа пре израде,
- омогућује брзу израду техничке базе података, почевши од техничких цртежа до технолошких инструкција за аутоматизовану израду,
- широко интегрисана производња рачунаром (Compuer Integrared Manufacturing - CIM)
- повезивање са спољашњим изворима (националним и светским) информација (комитети, берзе, произвођачи, дистрибутери, транспорт, ускладиштење, претовар) о роби и сировинама,
- праћење пословања (финансијских токова, залиха робе, материјала),
- праћење производа у експлоатацији (сервис, квалитет, корекције технологија, одржавања).
- координирају основне фабричке активности (маркетинг, планирање, инвестиције).

4. ПРОРАЧУН ЗАВАРЕНИХ СПОЈЕВА

4.1. Опште одредбе

Прорачунске вредности аксијалних сила, како у елементирна испуне таква и у појасевима, при граничном стању носивости не треба да прекораче одговарајуће прорачунске носивости елемената које се одређују према ЕН 1993-1-1[15].

Под условом да је геометрија веза у оквиру опсега вазења који је дату табели 4.1, прорачунске носивости заварених веза између елемената испуне од супљих профила и појасева од супљих профила правоугаоног иии квадратног попрецног пресека могу да се одреде коришћењем веуа у равни.

За везе који су унутар опсега вазења који је дат у табели 4.1., треба разматрати само прорачунске критеријуме који су обухваћени одговарајућом табелом. За прорачунску носивост везе треба усвојити најмању вредност која се добија на основу свих примењивих критеријума.

За везе изван опсега вазности који је дат у табели 4.1 треба размотрити све критеријуме дате у вези равни. Поред тога, треба узети у обзир и секундарне моменте савијања у вези који су последица њене ротационе крутости[15].

Табела 4.1. Опсег вазења за заварене везе између елемената испуне од ЦХС и РХС профила и појасних елемената од РХС профила[15]

Tip veze	Parametri veze (i = 1 ili 2, j = preklopljeni element ispune)					
	b_i / b_0 ili d_i / b_0	b_i / t_i i h_i / t_i ili d_i / t_i		h_0 / b_0 i h_i / b_i	b_0 / t_0 i h_0 / t_0	Razmak ili preklop b_i / b_j
		Pritisak	Zatezanje			
T, Y i X veze	$b_i / b_0 \geq 0{,}25$	$\frac{b_i}{t_i} \leq 35$ i $\frac{h_i}{t_i} \leq 35$ i Klasa 2	$\frac{b_i}{t_i} \leq 35$ i $\frac{h_i}{t_i} \leq 35$	$\geq 0{,}5$ ali ≤ 2	≤ 35 i Klasa 2	-
K i N veze sa razmakom	$b_i / b_0 \geq 0{,}35$ i $\geq 0{,}1 + 0{,}01\, b_o / t_o$				≤ 35 i Klasa 2	$\frac{g}{b_0} \geq 0{,}5(1-\beta)$ ali $\leq 1{,}5(1-\beta)$ [1] i kao minimum $g \geq t_1 + t_2$
K i N veze sa preklopom	$b_i / b_0 \geq 0{,}25$	Klasa 1			Klasa 2	$\lambda_{ov} \geq 25\%$ ali $\lambda_{ov} \leq 100\%$ [2] i $\frac{b_i}{b_j} \geq 0{,}75$
Elementi ispune kružnog preseka	$d_i / b_o \geq 0{,}4$ ali $\leq 0{,}8$	Klasa 1	$\frac{d_i}{t_i} \leq 50$	Kao gore, ali sa d_i koje zamenjuje b_i i d_j koje zamenjuje b_j.		

[1] Ako je $\frac{g}{b_0} > 1{,}5(1-\beta)$ i $g > t_1 + t_2$, vezu treba tretirati kao dve odvojene T i Y veze.

[2] Preklop se može povećati da bi se omogućilo da nožica preklopljenog elementa ispune bude zavarena za pojas.

5. СОФТЕРСКИ ПАКЕТ TOWER 7

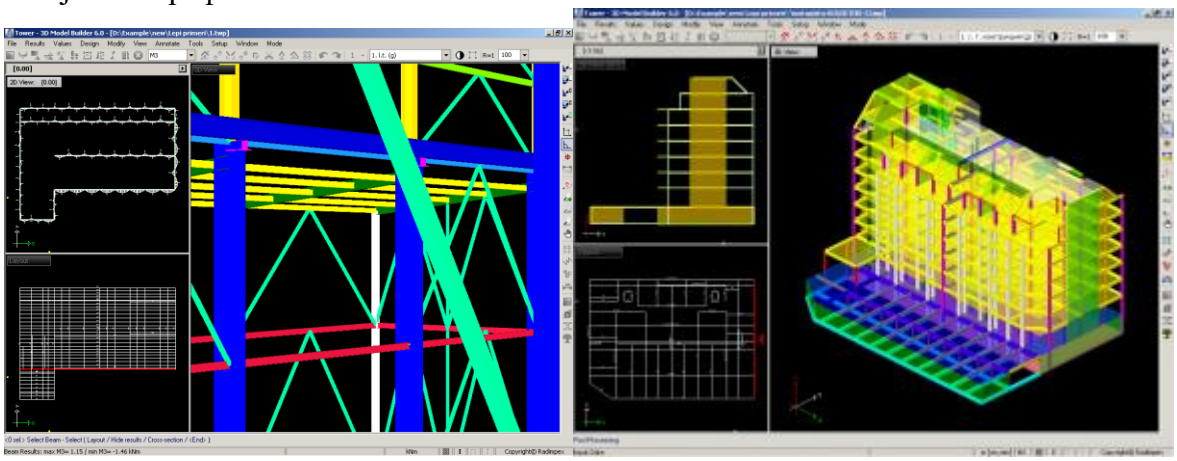
Towep 7, програм за статичку и динамичку анализу конструкција и димензионисање бетонских, челичних и дрвених елемената.

Towep 7 је програм за свеобухватну анализу утицаја у раванским и просторним конструкцијама. Обезбеђујући снажне алате који су аутоматизовани, интегрисани, свеобухватни и интуитивни, овај програм омогућава инжењерима повећање брзине и квалитета пројектовања. Верзија 7 је високо-професионалан алат високих перформанси, заснован на вишегодишњем искуству и најновијим сазнањима екипе експерата, инжењера и врхунских програмера[8].

5.1.Основне могућности

- Анализа статичких утицаја у конструкцији по теорији I и II реда, са линеарним, нелинеарним и еластопластичним понашањем
- Прорачун стабилности конструкције (одређивање критичних сила и дужина извијања)
- Прорачун својствених вредности (форме и периоди осциловања конструкције)
- Генерисање сеизмичког оптерећења по различитим стандардима (JUS, EC8, SNIP…)
- Аутоматско генерисање мреже коначних елемената
- Аутоматско генерисање маса у свим чворовима модела
- Анализа утицаја кроз дефинисане фазе грађења објекта (монтажне конструкције, спрегнуте конструкције, итд.)
- Фундирање на еластичној подлози и могућност моделирања тла у виду еластичног полупростора са дефинисањем слојева различитих својстава и топологије преко произвољног броја бушотина
- Моделирање монтажних таваница ортотропним плочама
- Греде и стубови променљивог попречног пресека (греде са вутама, призматични стубови, ламелирани дрвени носачи, итд.),
- Моделирање крутих веза у чворовима греда (офсет греда - дијаграми у светлим отворима),
- Ексцентрично постављање греда и стубова (реално моделирање подвлака у плочама, стубови скоковите промене попречног пресека, итд.),
- Анализа утицаја у преднапрегнутим елементима конструкције (произвољна геометрија каблова и прорачун губитака силе преднапрезања),
- Задавање потпуно произвољног карактера и правца деловања оптерећења
- Анализа утицаја од покретног оптерећења (дефинисање потпуно произвољне шеме и путање покретног оптерећења) као и прорачун утицајних линија за пресечне силе, деформације и реакције ослонаца уз одређивање критичног положаја покретног оптерећења и "пешачке навале",
- Аутоматско генерисање оптерећења на ротационо симетричним деловима модела услед различитих природних појава: сопствена тежина, снег, притисак, вода, земља, ветар,
- Прорачун услед температурних утицаја и померања ослонаца,
- Прорачун релативног угиба у плочама и гредама.,

- Аутоматско димензионисање армирано бетонских конструкција (JUS, EUROCODE, SNIP, DIN, BS, ACI, итд.),
- Аутоматско димензионисање челичних конструкција (JUS, EUROCODE),
- Аутоматско димензионисање дрвених конструкција (JUS, EUROCODE),
- Лако креирање квалитетне пројектне документације са заглављем, текстуалним извештајима и графичким блоковима .



Слика 5.1 Примери радова у програму TOWER 7

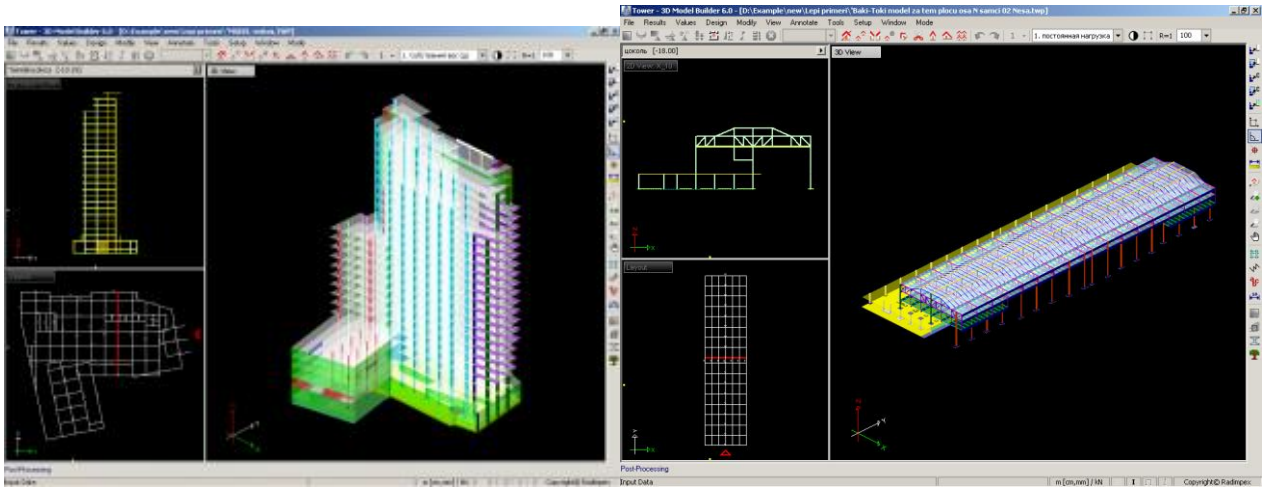
5.2 Графички интерфејс

- Дефинисање произвољних равни за цртање
- Симултано коришћење раванског и просторног цртања
- Прецизан избор тачака са цртежа (динамички оснап са комбиновањем критеријума)
- Динамички зум и пан. Динамичка ротација изометријског приказа модела (орбит)
- Манипулација са елементима цртежа (копирање, осно пресликавање, брисање, ротирање, продужавање, скраћивање, комплетан ундо/редо систем обнављања цртежа, итд.)
- Аутоматско генерисање вертикалних елемената конструкције
- Аутоматско генерисање ротационо симетричних тела (сфера, купа, свод, спирала)
- Рад са блоковима цртежа (снимање и учитавање произвољно одабраних делова модела)
- Груписање произвољно одабраних делова модела у целине и укидање видљивости осталим деловима модела (видљиви само стубови, зидови, типски спратови, штапови испуне, главни носачи, итд.)
- Визуелизација модела (Direct X рендер, шетање камером кроз објекат).

5.3. Обрада резултата прорачуна

- Брзо проналажење екстремних вредности утицаја на целом моделу или пак само на одабраној групи елемената (екстремне вредности нормалних сила само у стубовима, максимални моменти савијања у плочама типског спрата, максимална померања само зидова, итд.)

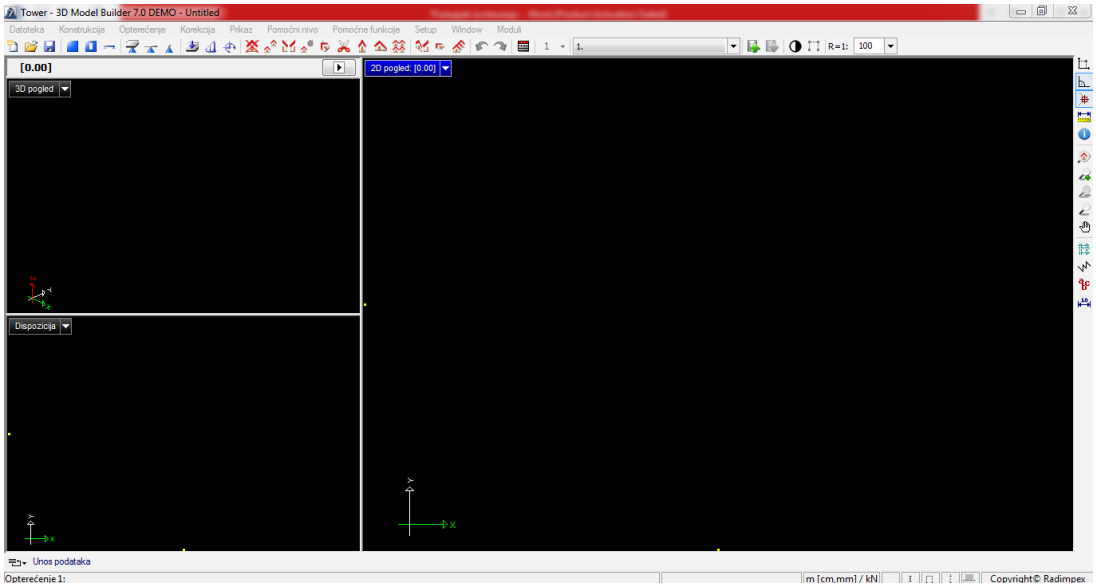
- Приказ резултата, како на целом просторном моделу, тако и на његовим појединим деловима (у одабраном раму, зиду, таваници, темељима, произвољно дефинисаном погледу, итд.)
- Приказ резултата у површинским елементима путем изолинија и дијаграма дуж произвољно задате линије пресека
- Приказ утицаја у линијским елементима путем дијаграма и путем градијента боје
- Приказ реакција ослонаца са смером и интензитетом
- Дијаграми расподеле напона у спрегнутим попречним пресецима кроз дефинисане фазе грађења
- Утицаји у појединачним деловима спрегнутог попречног пресека
- Једновремени приказ утицаја у свим стубовима и зидовима једног нивоа (увид у расподелу утицаја од сеизмике на све стубове и зидове једног спрата, прерасподела нормалних сила од вертикалног оптерећења на стубове и зидове датог нивоа, итд.)
- Приказ и анимација форми осциловања и деформисаног модела
- Потпуно аутоматизовано димензионисање армирано бетонских, челичних и дрвених конструкција (JUS, EUROCODE, SNIP, DIN, итд.)
- Усвајање арматуре у армирано бетонским конструкцијама са аутоматским креирањем детаља армирања и ехпортом у наш програм *"ArmCad 2005"*.
- Осим основне 32-битне, доступна је и 64-битна верзија програма са још већим капацитетом прорачуна и обраде резултата, повећане брзине и оптимизованих перформанса.



Слика 5.2. Примери радова у програму TOWER 7

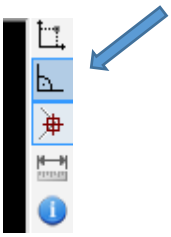
5.4. Приказивање поступка рада у софтеру

Приликом само стартовања софтера појављује нам се прозор тј радна провршина што је на слици 5.3.



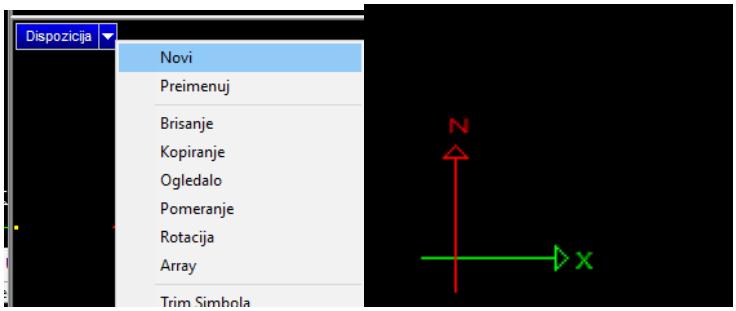
Слика 5.3 Радна површина

Након појављивања радне површине прво морамо да дефинишемо вертикалну раван у којој ћемо нацртати решетку. Опцијом OSNAP угасиш иконицу приказаној на слици 5.4.



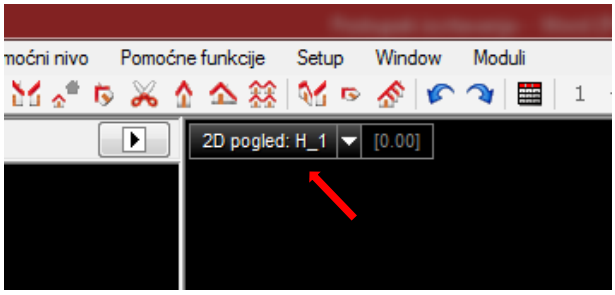
Слика 5.4. Опција OSNAP

Потом десним кликом на диспозицију отвараш падајуци мени на који кликеш десним кликом на “novo” где после у оквиру овог дела диспозиције нацрташ једну хоризоналну линију. Где се појаве после тога појаве у десном углу главна оса што је приказано на слици 5.5.



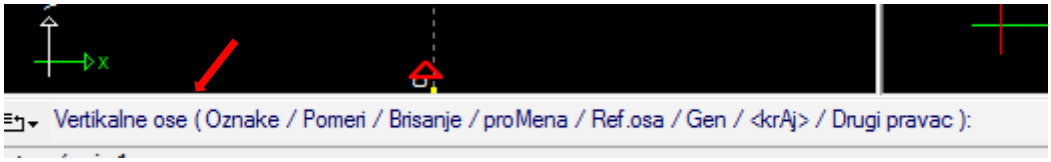
Слика 5.5. Мени диспозиције и главна оса

Кликом на 2D поглед прелазимо на десни део приказа у коме цемо да унесемо помоћну осу за исцртавање. У десно делу екрана налази се финкција OSE активирањем добијамо две осе приказано је на слици 5.6.



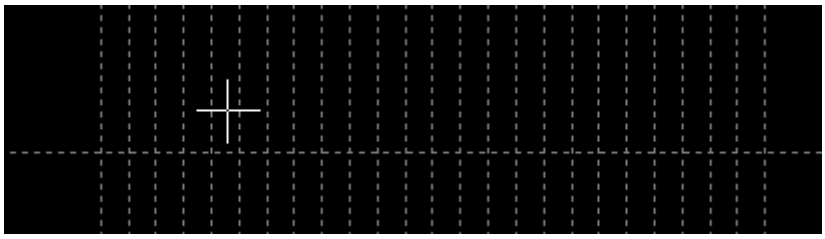
Слика 5.6. Приказ 2Д погледа

На дну екрана нам се налази опиција где уносимо колико вертикалних оса желимо приказано је на слици 5.7. у овом слуцају 24 тако да укуцамо 24*1.25 што нам је растојање које смо усвојими између решетки.



Слика 5.7. Задавање верктикалне осе

И добија се приказ оса које смо задали што се да видети на слици 5.8,



Слика 5.8. Приказ добијених оси

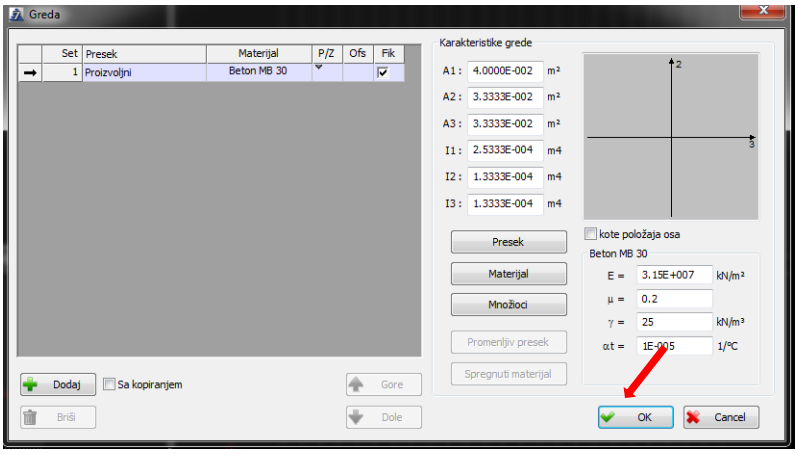
Сада променимо правац оса у хоризонаталу и задајемо други правац тако што ћемо да укуцамо 1.25 који нам је приказано на слици 5.9.

Слика 5.9. Задавање хоризанталне осе

Потребно је после генерисања оса да се дефинише носач, тако што кликнемо на иконицу у гњем десном углу и доле ће да нам избаци поље где задајемо прву тачку греде и идемо на опцију SET. Где нам се отвара прозор за дефинисање профила које ћемо користити.

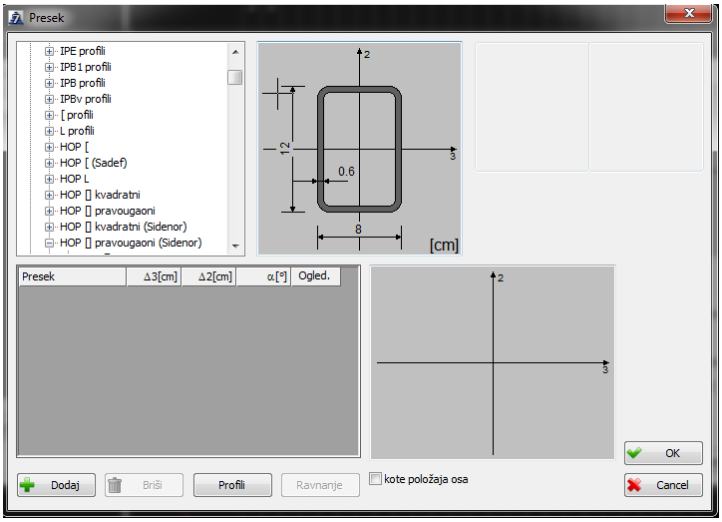
Слика 5.10. Опција SET

Отварањем протора ГРЕДА дефинисемо профил, материјал и и може да се виде све карактеристике тих профила. Кликом на опцију Материјал мењамо материјал приказано на слици 5.11. у челик.



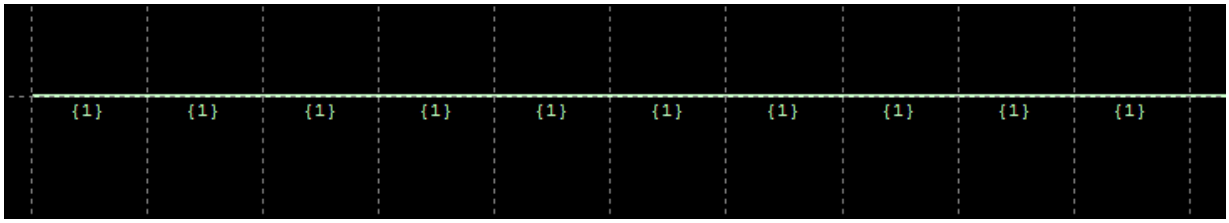
Слика 5.11. Мени дефинисања материјала

Кликом на опцију “Presek” отварамо прозор за одабир профила који смо усвојили у већ израчунатом алалитиком примеру и то је HOP pravugaoni SIDENOR, попречног пресека 120x80x6 који задовољава нашу конструкцију слика 5.12.



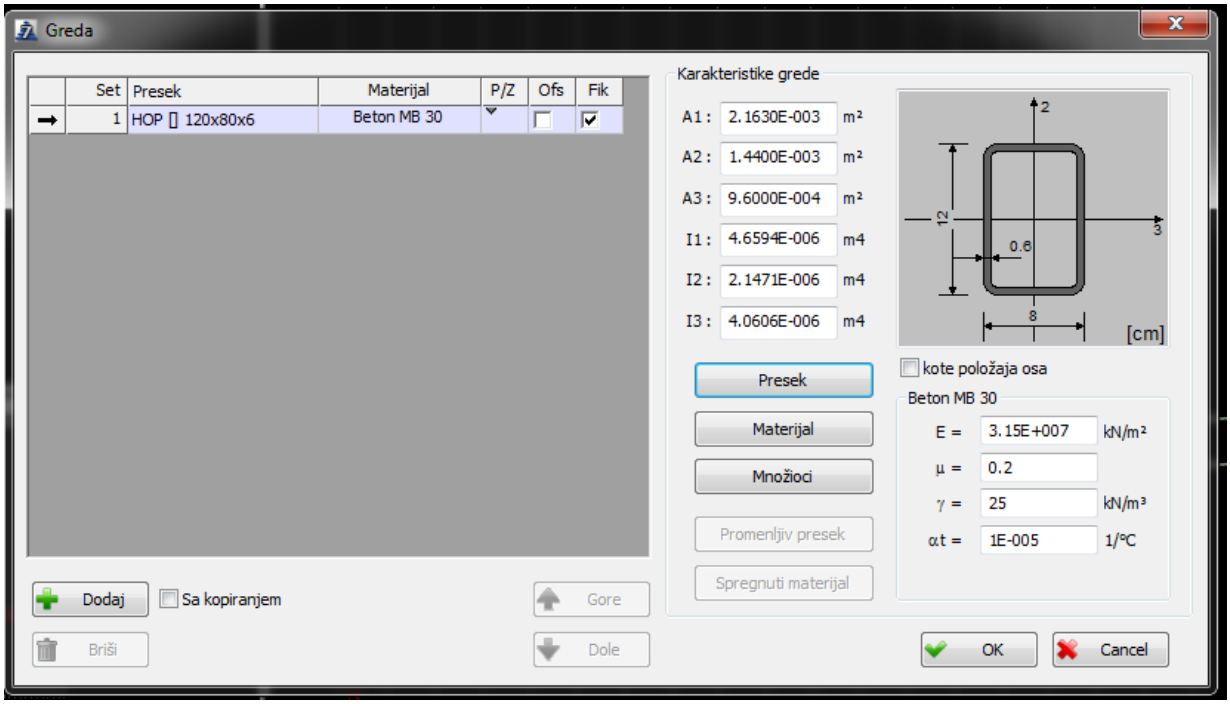
Слика 5.12 Дефинисање пресека профила

Када смо дефинисали профил укључујемо опцију OSE и крећемо да дефинишемо решетке од 1.25м у горњем и доњем појасу тако што идем од пресека до пресека задатих помоћних линија. Што је приказано на слици.



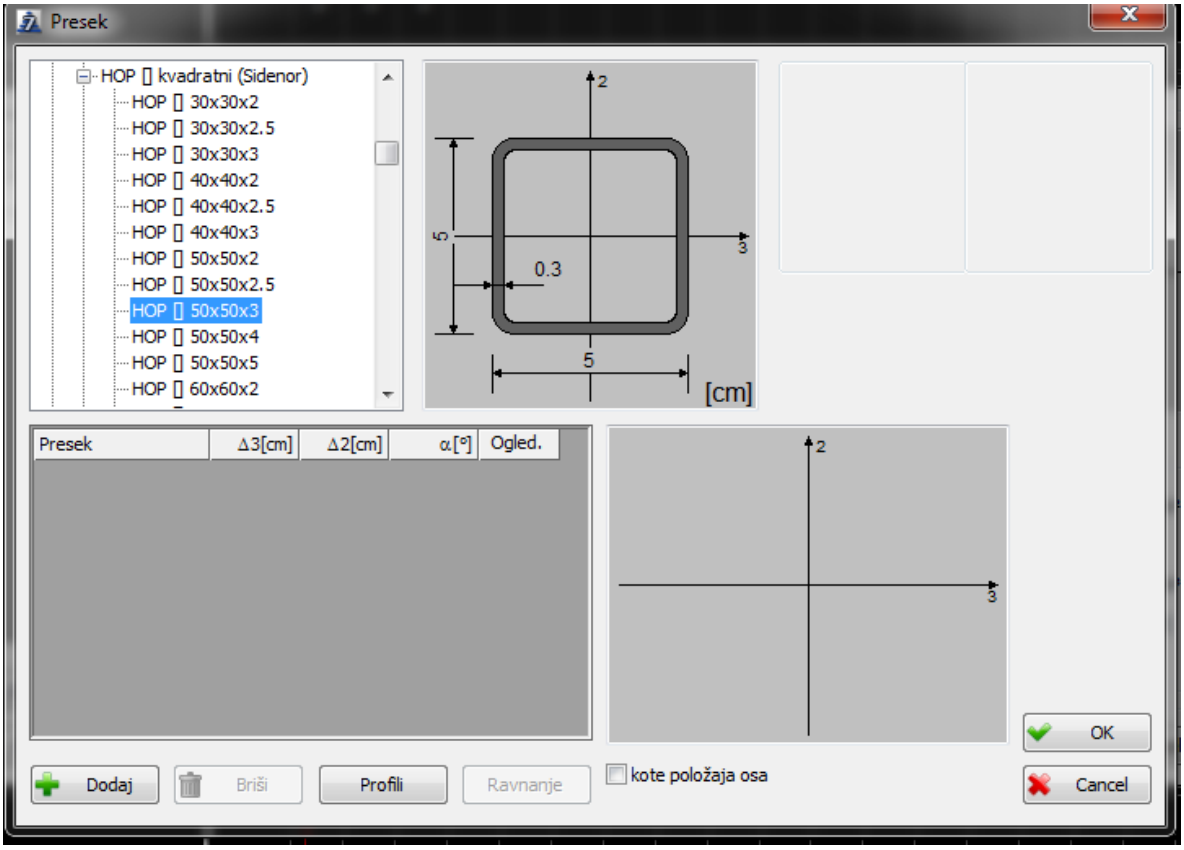
Слика 5.13 Приказ осе

Када смо завршили са цртањем горење и доњег појаса морамо да унесемо вертикалне и дијагоналне испуне, тако сто поново идемо на опцију SET где нам се отвара прозор где морамо да усовимо профил за вертикалну и дијагоналну испону као што се види на слици 5.14.



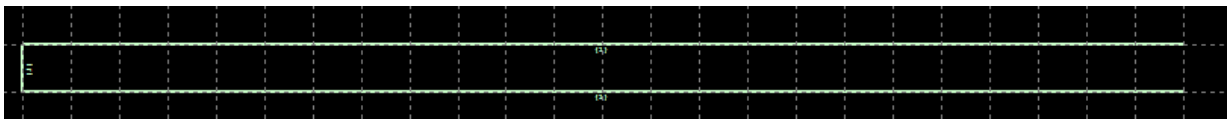
Слика 5.14. Уносење вредности за вертикалну и дијагоналну испону

Идемо кликом на пресек и дефинишемо испуну као код аналитичког примера 50x50x3, кликенмо на одговарајуци профил и кликом ОК потврђујемо.

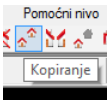


Слика 5.15 Попречни пресек испуне

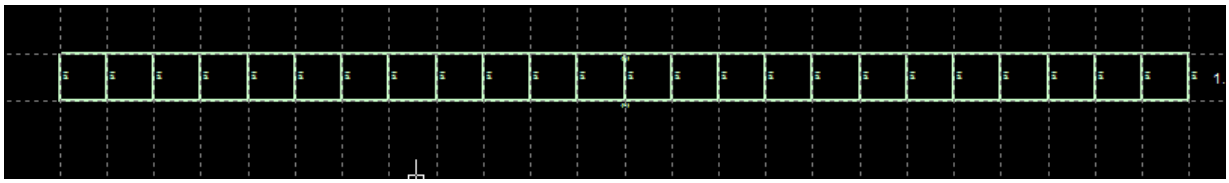
После задавања профила испуна враћамо се на цртање и нацртамо један вертикални штап горе и један доле и две вертикална појаса да би добио вертикални штап слика 5.16.



Слика 5.16 Приказ бертикалног штапа

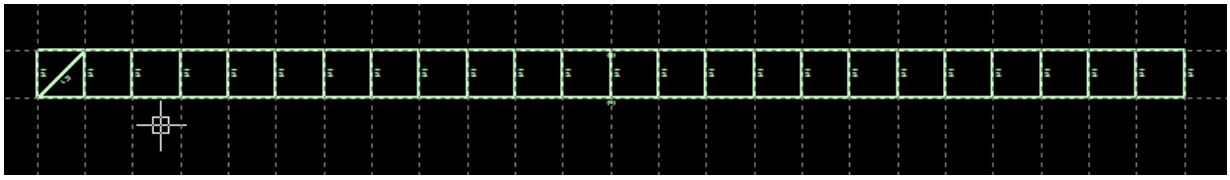
Активацијом иконице 

копирање можемо једноставним кликом да копирамо 24 штапа вертикалне испуне уместо цртања појединацно сваке, копирамо тако што помножимо 24 штапа са растојањем 1.25м и добијемо решеткасту конструкцију слика 5.17,



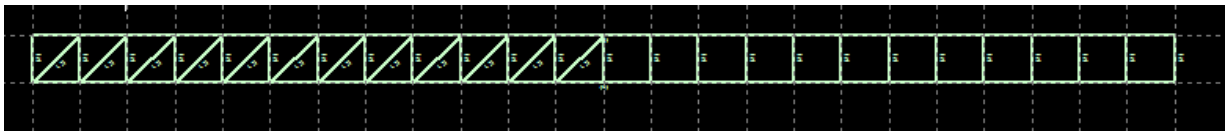
Слика 5.17 Приказ бертикалних испуна

Након тога цртамо дијагонале опет кликом на греду и спојиш у првом квадрадту леву и десну дијагоналу што се види на слици 5.18.



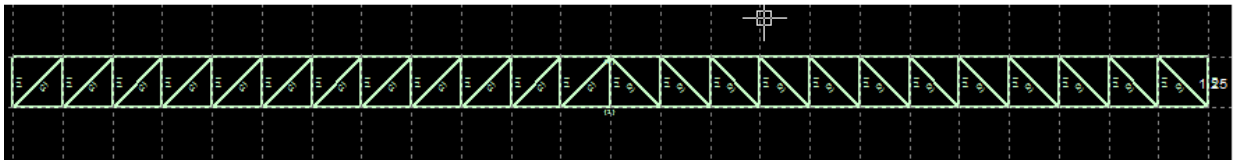
Слика 5.18 Приказ једне дијагоналне испуне

Истим принципом копирања добијемо и добијемо дијагоналене испуне до пола решетке слика 5.19,



Слика 5.19 Приказ дијагоналних испуна

и исто нацртамо остале дијагонале обрнуто јер смо тако задали у аналитичком примеру,



Слика 5.20 Решетласт носач

6. ПРИМЕР

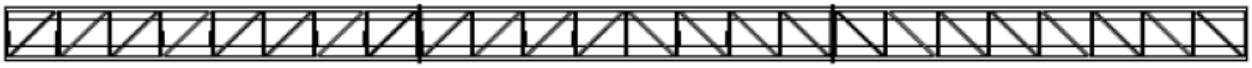
6.1. Аналитичко решавање

У оквиру овог рада конструисана је решеткаста конструкција којом се премошћава препрека у виду превођења преко реке цев која „транспортује“ воду помоћу пешеткасте конструкцијеспортује“ воду. Као референтна локација анализиране решеткасте конструкције узет је град Крагујевац. Неки од основних полазних података су приказани у *Табели 6.1.*

Табела 6.1. Основни подаци потребни за конструисање решеткасте конструкције

Карактеристике цеви	*ø500 x 5mm*
Дужина моста	*30000 m*

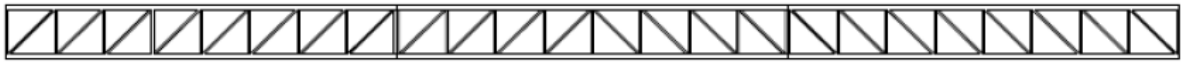
Скица идејног решења приказана је на слици *6.1.*



Слика 6.1. - Скица решеткасте конструкције.

Усвојено је да дужина моста износи 30 *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 1,25 м. Ако би се дотична секција посматрала у простору онда би једна просторна решеткаста секција изгледала као коцка, јер просторна ширина решетке износи 1,25 m. Што се тиче раванске секције, усвојено је да се дијагонална испуна налази под углом од 45°, при чему њена „математичка“ дужина износи око 1.76 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 24 индивидуалних решеткастих секција.



Слика 6.2. - Скица решеткасте конструкције

Као материјал од којег ће се израдити целокупна решеткаста конструкција усваја се челик С235 по Еврокоду ЕЦ 1993 1-3[10]. Ово је нелегирани конструкциони челик, у ЈУС стандарду налази се у фамилији челика Č035x, а његови најближи пандани су Č0351, Č0352 и Č0353. Карактеристике овог челика приказане су у Табели 6.2[10].

Табела 6.2. Карактеристике челика Č0235 за дебљине елемената мање од 40 мм, ($t \leq 40\ mm$)

Граница течења (fy)	235 MPa
Затезна чврстоћа (fu)	360 MPa
Густина (ρ)	7800 $kg/m3$

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

6.1.1.1. Одређивање дејства снега, цеви, воде у цеви и решеткасте конструкције

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

$$G_{cev} = D \cdot \pi \cdot \delta \cdot l \cdot \rho \cdot g = 0.5 \cdot \pi \cdot 0.005 \cdot 1{,}25 \cdot 7800 \cdot 9.81 = 756.1\ N \tag{6.1}$$

$$G_{vode} = \frac{D_{un.cevi}^2 \cdot \pi}{4} \cdot l \cdot \rho \cdot g = \frac{0.49^2 \cdot \pi}{4} \cdot 1{,}025 \cdot 1000 \cdot 9.81 = 2407.7 N \tag{6.2}$$

Пошто се ова дејства преносе на две раванске решетке, укупно дејство по чвору за једну раванску решетку представља половину горе израчунатих вредности.

Пре одређивања тежине решеткасте конструкције потребно је грубо усвојити профиле од којих би се израдила анализирана конструкција. На основу интиуције усваја се профил 60x80x4 као појасни профил, при чему његова маса на 1,25 м износи 7.66 kg (одређено је помоћу софтера Аутодеск Инвентор).

Пошто се ове два ова профила налазе на једној секцији онда тежина појаса износи:

$$G_{konstrukcije} = 2 \cdot d_{cevi} \cdot m_{cev} \cdot g$$

$$G_{konstrukcije} = 2 \cdot 1.25 \cdot 7.66 \cdot 9.81 = 402.7\ N \tag{6.3}$$

Оптерећење од снега се за задату локацију може срачунати коришћењем Еврокода 1991 1-3[2], стр.37:

$$\mathrm{sk} = (0{,}264 \cdot \mathrm{z} - 0{,}002) \cdot \left[1 + \left(\frac{A}{256}\right)^2\right] \tag{6.4}$$

где је:

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

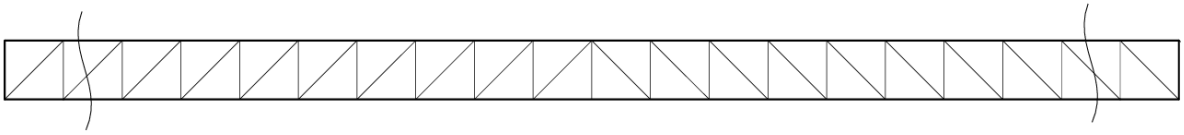
A – надморска висина локације изнад нивоа мора.

$$sk = (0.264 \cdot 1 - 0.002) \cdot \left[1 + \left(\frac{500}{256}\right)^2\right] = 1.264 \frac{kN}{m^2} \tag{6.5}$$

Усваја се да је свака секција изложена дејству снега на површини од *0.25* m^2. На основу овог податка, ово дејство по решеткастој секцији износи:

$$G_{snega} = 2 \cdot 0.5 \cdot 1.25 \cdot 1{,}261 \cdot 9.81 = 625\ N \tag{6.6}$$

Пошто су позната дејства по једној решеткастој секцији, сада је потребно израчунати укупно дејство на 23 решеткастих секција које се налазе у средини решеткасте конструкције (између два пресека), као што је приказано на слици 6.3.

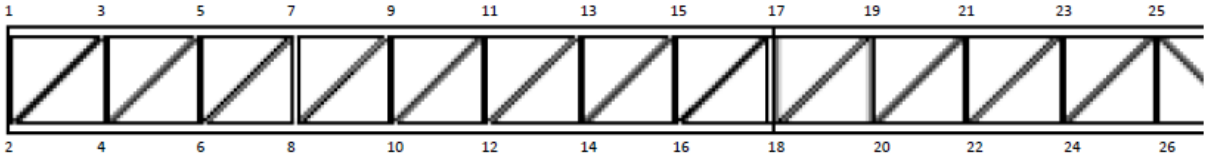


Слика 6.3. - Анализирани део решетке

$$G_{ukupno} = G_{vode} + G_{cevi} + G_{snega} + G_{konstrukcije}$$

$$G_{ukupno} = 2407.7 + 756.1 + 625 + 402.3$$

$$G_{ukupno} = 4191.1N \tag{6.7}$$



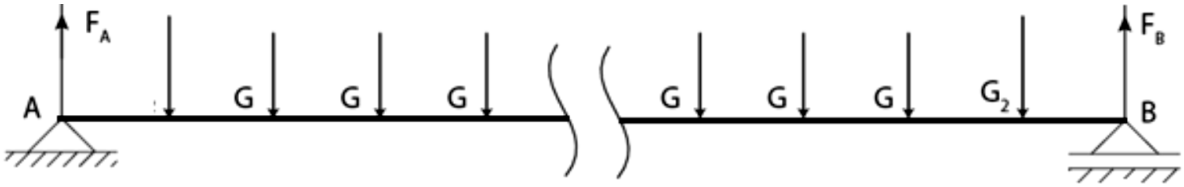
Слика 6.4. - Чворови на носећој конструкцији

6.1.2. 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.

6.1.2.1. Одређивање отпора ослонаца

Отпори ослонаца су одређени за раванску решетку која је упрошћено приказана на слици 3.1. 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 6.4. одговарају димензијама решеткасте конструкције приказане на слици 6.5.



Слика 6.5. - Скица решеткасте решеткасте конструкције потребна за одређивање отпора ослонаца

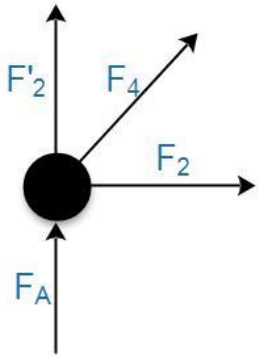
На основу слике изнад може се извршити одређивање отпора ослонаца:

$$F_t = 0 \Rightarrow 2 \cdot F_A = 23 \cdot G$$
$$F_t = 0 \Rightarrow F_A = \frac{23 \cdot 4919{,}1}{2} \qquad (6.8)$$
$$F_A = 48197.65N$$

6.1.2.2. 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 Анексу 1. Потребно је напоменути да штапови F_1 и $F2$ 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 $F_1 = F_2 = 0\ N$. Због ове чињенице анализа сила у Чвору 1 није ни извршена. Приказ чворова је приказан на слици 6.4.

Сада је потребно извршити анализу сила у *Чвору 2*, при чему је шема сучељних сила приказана на слици 6.6.

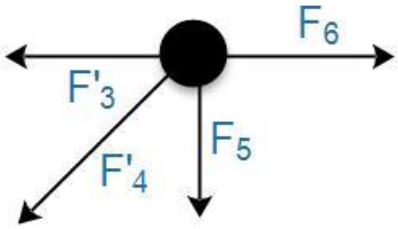


$$x: F_3 + F_4 \cdot \cos 45° = 0$$
$$F_3 = -F_4 \cdot \cos 45°$$
$$F_3 = 48197.65N$$

$$y: F_A + F'_1 + F_4 \cdot \sin 45° = 0$$
$$F_4 = \frac{-F_A}{\sin 45°}$$
$$F_4 = -68161.8N$$

Слика 6.6. Систем сучељних сила за чвор 3

Сада је потребни извршити анализу сука у Чвору 3, при чему је шема сучаоних сила приказана на слици 6.7.

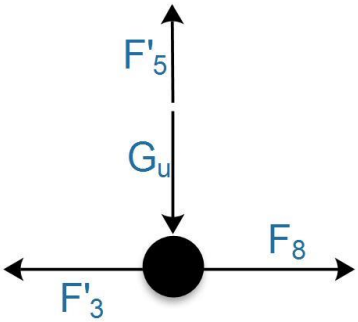


$$x: F_6 - F'_2 - F'_4 \cdot \cos 45° = 0$$
$$F_6 = F'_4 \cdot \cos 45°$$
$$F_6 = -48197.7N$$

$$y: -F_5 - F'_4 \cdot \sin 45° = 0$$
$$F_5 = -F'_4 \cdot \sin 45°$$
$$F_5 = 48197.654N$$

Слика 6.7. Систем сучељних сила за чвор 4

Сада је потребно извршити анализу сила у Чвору 4, при чему је шема сучељних сила приказана на слици 6.8



$$x: F_8 - F_3' + F_7 \cdot \cos 45° = 0$$

$$F_8 = F_3' - F_7 \cdot \cos 45°,$$

$$F_8 = 92204.2N$$

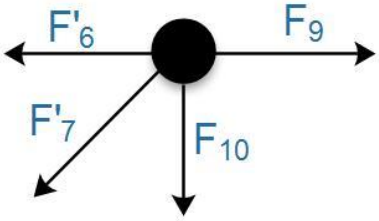
$$y: F_5' - G_{ukupno} + F_7 \cdot \sin 45° = 0$$

$$F_7 = \frac{-F_5' + G_{ukupno}}{\sin 45°},$$

$$F_7 = -62234.2N$$

Слика 6.8. Систем сусучељних сила за чвор 4

Сада је потребно извршити анализу сила у Чвору 5, при чему је шема сучељних сила приказана на слици 6.9.



$$y: -F_{10} - F_7' \cdot \sin 45° = 0$$

$$F_{10} = -F_7' \cdot \sin 45°,$$

$$F_{10} = 44006.55N$$

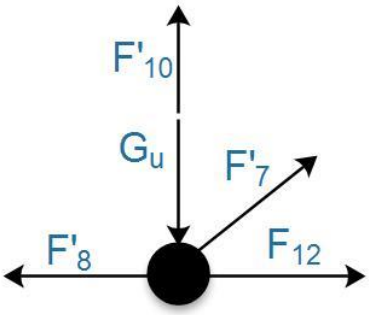
$$x: F_9 - F_6' - F_7' \cdot \cos 45° = 0$$

$$F_9 = F_6' + F_7' \cdot \cos 45°,$$

$$F_9 = -92204.2N$$

Слика 6.9. Систем сусучељних сила за чвор 4

Сада је потребно извршити анализу сила у Чвору 6, при чему је шема сучељних сила приказана на слици 6.9.



$$x: F_{12} + F_{11} \cdot \cos 45° - F_8' = 0$$

$$F_{12} = -F_{11} \cdot \cos 45° + F_8'$$

$$F_{12} = 132019.65N$$

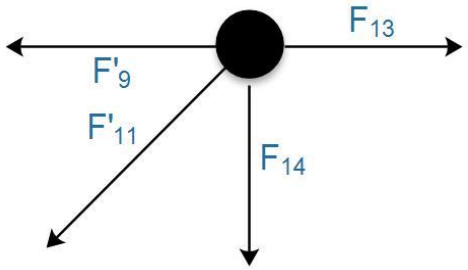
$$y: F_{10}' - G_{ukuno} + F_{11} \cdot \sin 45° = 0$$

$$F_{11} = \frac{-F_{10}' + G_{ukuno}}{\sin 45°},$$

$$F_{11} = -56307.54N$$

Слика 6.9. Систем сучељних сила за чвор

Сада је потребно извршити анализу сила у Чвору 7, при чему је шема сучељних сила приказана на слици 6.10.

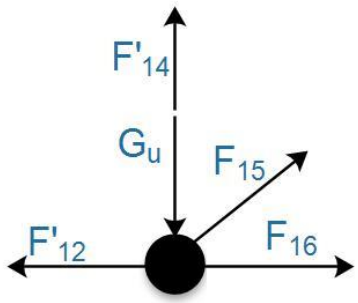


$$x: F_{13} - F'_{9} - F'_{11} \cdot \cos 45° = 0$$
$$F_{13} = F'_{9} + F'_{11} \cdot \cos 45°,$$
$$F_{13} = -132020N$$

$$y: -F_{14} - F'_{11} \cdot \sin 45° = 0$$
$$F_{14} = -F'_{11} \cdot \sin 45°,$$
$$F_{14} = 39815.45N$$

Слика 6.10. Систем сучељних сила за чвор 7

Сада је потребно извршити анализу сила у Чвору 8, при чему је шема сучељних сила приказана на слици 6.11

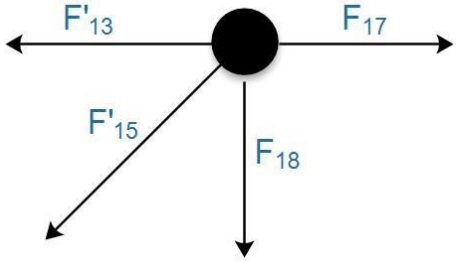


$$x: F_{16} + F_{15} \cdot \cos 45° - F'_{12} = 0$$
$$F_{16} = -F_{15} \cdot \cos 45° + F'_{12},$$
$$F_{16} = 167644N$$

$$y: F'_{14} - G_{укупно} + F_{15} \cdot \cos 45° = 0$$
$$F_{15} = \frac{-F'_{14} + G_{укупно}}{\cos 45°},$$
$$F_{15} = -50380.4N$$

Слика 6.11. Систем сучељних сила за чвор 8

Сада је потребно извршити анализу сила у Чвору 9, при чему је шема сучељних сила приказана на слици 6.12



$$x: F_{17} - F'_{13} - F'_{15} \cdot \cos 45° = 0$$
$$F_{17} = F'_{13} + F'_{15} \cdot \cos 45°$$
$$F_{17} = -167644N$$

$$y: -F_{18} - F_{15} \cdot \sin 45° = 0$$
$$F_{18} = -F_{15} \cdot \sin 45°,$$
$$F_{18} = 356424.34N$$

Слика 6.12. Систем сучељних сила за чвор 9

У наставку задатка одрадили смо систем сучељних слила за свих 25 чворова и вредности добијаних сила представили смо све вредности претходно израчунатих сила у штаповима решетке су приказане у *Табели 3.1.*, док је у *Табели 3.2.* представљен тип напрезања претходно анализираних штапова. У *Анексу 1.* шематски су приказана напрезања свих штапова у хоризонталном делу анализиране решеткасте конструкције.

Табела 6.3.Силе у штаповима анализиране решетке

Појас	**Дијагонална**	**Вертикална испуна**
$F_2 = 0\ N$	$F_4 = -68161.8\ N$	$F_1 = 0\ N$
$F_3 = 48197.65\ N$	$F_7 = -62234.2\ N$	$F_5 = 48197.65\ N$
$F_6 = -48197.7\ N$	$F_{11} = -56305.54\ N$	$F_{10} = 44006.55\ N$
$F_8 = 92204.2\ N$	$F_{15} = -50380.40N$	$F_{14} = 39815.45\ N$
$F_9 = -92204.2\ N$	$F_{19} = -44453.3\ N$	$F_{18} = 35624.35\ N$
$F_{12} = 132019.65\ N$	$F_{23} = -38526.2\ N$	$F_{21} = 31433.25\ N$
$F_{13} = -132020\ N$	$F_{27} = -32599.1\ N$	$F_{26} = 27242.15\ N$
$F_{16} = 167644\ N$	$F_{31} = -26671.99\ N$	$F_{29} = 23051.05\ N$
$F_{17} = -167644\ N$	$F_{35} = -20744.9\ N$	$F_{33} = 18859.95\ N$
$F_{20} = 199077.3\ N$	$F_{39} = -14817.8\ N$	$F_{38} = 10477.75\ N$
$F_{22} = -199077.3\ N$	$F_{43} = -8890.67\ N$	$F_{42} = 6286.65\ N$
$F_{24} = 226319.4\ N$	$F_{48} = -2963.56\ N$	
$F_{25} = -226319.4N$		
$F_{28} = 24937045\ N$		
$F_{30} = -249370.45\ N$		
$F_{32} = 268230.4\ N$		
$F_{34} = -268230.4$		
$F_{36} = 282899.3\ N$		
$F_{37} = -282899.3\ N$		
$F_{40} = 293377\ N$		
$F_{41} = -293377\ N$		
$F_{44} = 299663.1\ N$		
$F_{46} = -299663.1N$		
$F_{47} = 301759.2\ N$		

Табела 6.4. Напрезања анализиране решетке

Појас	**Дијагонална**	**Вертикална испуна**
F_2 = 0	F_4 = Притисак	F_1 = 0
F_3 = Затезање	F_7 = Притисак	F_5 = Затезање
F_6 = Притисак	F_{11} = Притисак	F_{10} = Затезање
F_8 = Затезање	F_{15} = Притисак	F_{14} = Затезање
F_9 = Притисак	F_{19} = Притисак	F_{18} = Затезање
F_{12} = Затезање	F_{23} = Притисак	F_{21} = Затезање
F_{13} = Притисак	F_{27} = Притисак	F_{26} = Затезање
F_{16} = Затезање	F_{31} = Притисак	F_{29} = Затезање
F_{17} = Притисак	F_{35} = Притисак	F_{33} = Затезање
F_{20} = Затезање	F_{39} = Притисак	F_{38} = Затезање
F_{22} = Притисак	F_{43} = Притисак	F_{42} = Затезање
F_{24} = Затезање	F_{48} = Притисак	
F_{25} = Притисак		
F_{28} = Затезање		
F_{30} = Притисак		
F_{32} = Затезање		
F_{34} = Притисак		
F_{36} = Затезање		
F_{37} = Притисак		
F_{40} = Затезање		
F_{41} = Притисак		
F_{44} = Затезање		
F_{46} = Притисак		
F_{47} = Затезање		

6.2. Димензионисање штапова

У овом поглављу је извршено димензионисање свих штапова у анализираној решеткастој конструкцији. Најоптерећенији *је Појас 24* чија аксијална сила износи F_{47} = 301759.2N. На основу овог штапа се врши димензионисање на бази аксијалне силе. Овај прорачун је извршен коришћењем Еврокод 1993 1-1 [7] стр. 57.

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1.0 <; N_{Ed} = 301759.2N \tag{6.9}$$

где су:

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

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

$$N_{t,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \tag{6.10}$$

где су:

А – површина попречног пресека,

f_y – граница развлачења материјала,

γ_{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 [7] стр. 49. и 50.

$$c_1 = 80 - 2 \cdot 3 = 74\ mm\ ;\ t_1 = 3\ mm;\ \varepsilon = 1\ za\ f_y = 235\ MPa$$

$$\frac{c_1}{t_1} = \frac{74}{3} = 24.6 < 33 \cdot \varepsilon = 33 \tag{6.11}$$

$$c_1 = 60 - 2 \cdot 3 = 54\ mm;\ t_1 = 3\ mm;\ \varepsilon = 1\ za\ f_y = 235\ MPa$$

$$\frac{c_1}{t_1} = \frac{54}{3} = 18 < 33 \cdot \varepsilon = 33 \tag{6.12}$$

Анализирани профил 80x60x3 је прве класе, при чему је $\gamma_{M0} = 1.1$.

$$\frac{16577.01}{\frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}}} \leq 1.0 \Rightarrow A \geq \frac{301759.2}{\frac{f_y}{\gamma_{M0}}} = \frac{301759.2}{235} = 1284.082 mm^2 \tag{6.13}$$

На основу прорачуна може се закључити да претходно усвојен профил 80x60x3 незадовољава захтевану површину попречног пресека због превелике аксијалне силе. Због тога морамо да усвојимо профил *120x80x7* који задовољава на аксијалну и извијену силу[13]. Овај профил се такође налази у понуди локалног добављача и његова провршина попречног пресека је[14]:

$$A = 2436 mm^2 \tag{6.14}$$

Поред провере на аксијално напрезање, сада је потребно извршити проверу на извијање најоптерећенијег притиснутог појаса. Прорачун је извршен коришћењем Еврокода 1993 1-1[7], стр. 66-68.

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1.0 <; N_{Ed} = 301759.2 N\ , \tag{6.15}$$

где је:

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

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}}, \tag{6.16}$$

где су:

χ – коефицијент редукције за одговарајућу криву извијања,

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

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 + \bar{\lambda}^2}}; \chi \leq 1.0\ , \tag{6.17}$$

где су:

Φ – вредност за одређивање коефицијента редукције χ,

$\bar{\lambda}$ – релативна виткост.

$$\Phi = 0.5\left[1+\alpha\left(\bar{\lambda}-0.2\right)+\bar{\lambda}^{2}\right], \tag{6.18}$$

где је:

α – коефицијент имперфекције за одговарајућу криву извијања.

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A\cdot f_y}{N_{cr}}}, \tag{6.19}$$

где је:

N_{cr} – еластична критична сила за релевантан модел извијања која је заснована на бруто карактеристикама пресека, овај израз се не налази у Еврокодовима већ је преузет из других литературних извора [15].

$$N_{cr} = \frac{\pi^2\cdot E\cdot I_{\min}}{l_r^2}, \tag{6.20}$$

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 Еврокодовима већ је преузет из других литературних извора [16].

$$l_r = \beta\cdot l, \tag{6.20}$$

где су:

β – 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 β износи β=1., [16].

Сада се може извршити прорачун на извијање профила 120x80x7, основне карактеристике профила преузете су из одговарајуће литературе [13]. Пре прорачуна извршено је и одређивање класе попречног пресека.

$$c_1 = 120 - 2\cdot 7 = 106\ mm\ ;\ t_1 = 7\ mm;\ \varepsilon = 1\ za\ f_y = 235\ MPa$$

$$\frac{c_1}{t_1} = \frac{106}{7} = 15.14 < 33\cdot\varepsilon = 33 \tag{6.21}$$

$$c_1 = 60 - 2\cdot 3 = 54\ mm;\ t_1 = 3\ mm;\ \varepsilon = 1\ za\ f_y = 235\ MPa$$

$$\frac{c_1}{t_1} = \frac{54}{3} = 18 < 33\cdot\varepsilon = 33 \tag{6.22}$$

Попречни преске усвојеног профила је прве класе.

$$I_{min} = 2324500\ mm^4;\ A = 2436\ mm^2;\ E = 2.1\cdot 10^5\ MP_a, \tag{6.23}$$

$$l_r = \beta\cdot l = 1\cdot 1.25 = 1.25\ m, \tag{6.24}$$

$$\phi = 0.5\cdot[1 + 0.49\cdot(0.430882 - 0.2) + 0.4308822] = 0.649396\ . \tag{6.25}$$

$$\chi = \frac{1}{0.649396 + \sqrt{0.649396^2 + 0.430882^2}} = 0.880862 \tag{6.26}$$

$$N_{b,Rd} = \frac{0.880862 \cdot 2436 \cdot 235}{1.1} = 458416.8N\ , \tag{6.27}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{301759.2}{458416.8} = 0.65369258 \leq 1.0 \tag{6.28}$$

На основу извршеног прорачуна закључено је да усвојен профил 120x80x7 задовољава проверу и на извијање и аксијалну 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“ кутијасти профил 50x50x3, који се такође налази у понуди локалног добављача, [13][14]. Такође је усвојено да је штап зглобно ослоњен на оба ослонца. Пре прорачуна на извијање одређена је и класа попречног пресека.

$$c_1 = 50 - 2 \cdot 3 = 46\ mm\ ;\ t_1 = 3\ mm;\ \varepsilon = 1\ za\ f_y = 235\ MPa$$

$$\frac{c_1}{t_1} = \frac{50}{3} = 16.6 < 33 \cdot \varepsilon = 33 \tag{6.29}$$

$$c_1 = 50 - 2 \cdot 3 = 46\ mm;\ t_1 = 3\ mm;\ \varepsilon = 1\ za\ f_y = 235\ MPa$$

$$\frac{c_1}{t_1} = \frac{50}{3} = 16.6 < 33 \cdot \varepsilon = 33 \tag{6.30}$$

Попречни пресек усвојеног профила је прве класе.

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1.0 <; N_{Ed} = 68161.77N\ , \tag{6.20}$$

$$I_{min} = 234000\ mm^4;\ A = 2436\ mm^2;\ E = 2.1 \cdot 10^5\ MPa,$$

$$l_r = \beta \cdot l = 1 \cdot 1.767767 = 1.767767\ m\ , \tag{6.31}$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot 2.1 \cdot 10^5 \cdot 234000}{1767.767^2} \tag{6.32}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{695 \cdot 235}{155197.55}} = 155197.555N \tag{6.33}$$

$$\phi = 0.5 \cdot [1 + 0.49 \cdot (1.02585 - 0.2) + 1.02585^2] = 1.228517\ . \tag{6.34}$$

$$\chi = \frac{1}{1.228517 + \sqrt{1.228517^2 + 1.02585^2}} = 0.525086 \tag{6.35}$$

$$N_{b,Rd} = \frac{0.525086 \cdot 695 \cdot 235}{1.1} = 77963.28N\,, \tag{6.36}$$

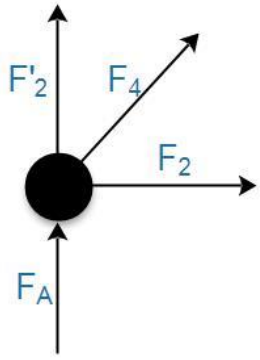
$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{68161.77}{77963.28} = 0.87428049 \leq 1.0 \tag{6.37}$$

6.3. Одређивање угиба решетке

Угиб ће се израчунати на основу методе виртуелног рада при чему је поступак прорачуна преузет из одговарајућег литературног извора, [17]. Угиб је анализиран у централном доњем чвору раванске решетке, овај чвор је илустративно приказан у *Анексу 1*. У овом чвору ће се поставити јединично оптерећење од 1 kN на основу којег ће се наћи оптерећења у штаповима.

Пошто се оптерећење налази у средини решетке, отпори ослонаца су међусобно једнаки и они износе $F_A = F_B = 0.5\ kN$.

Сада је потребно извршити анализу сила у Чвору 2, при чему је шема сучељних сила приказана на слици 6.12.

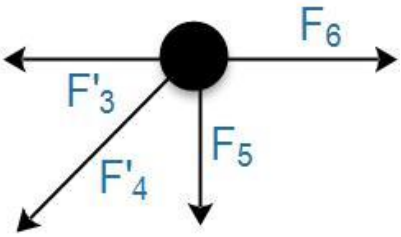


$$x: F_3 + F_4 \cdot \cos 45° = 0$$
$$F_3 = -F_4 \cdot \cos 45° = 707.107 \cdot \cos 45°$$
$$F_3 = 500N$$

$$y: F_A + F_1' - F_4 \cdot \sin 45° = 0$$
$$F_4 = \frac{F_A}{\sin 45°} = \frac{500}{\sin 45°}$$
$$F_4 = 707.107N$$

Слика 6.12. Систем сучељних сила за чвор 2

Сада је потребно извршити анализу сила у Чвору 3, при чему је шема сучељних сила приказана на слици 6.13.

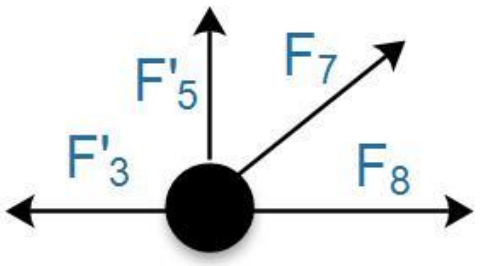


$$x: F_6 - F_2' - F_4' \cdot \cos 45° = 0$$
$$F_6 = F_4' \cdot \cos 45° = 707.107 \cdot \cos 45°$$
$$F_6 = 500N$$

$$y: F_5 - F_4' \cdot \sin 45° = 0$$
$$F_5 = F_4' \cdot \sin 45° = 707.107 \cdot \sin 45°$$
$$F_5 = 500N$$

Слика 6.13. Систем сучељних сила за чвор 4

Сада је потребно извршити анализу сила у Чвору 4, при чему је шема сучељних сила приказана на слици 6.14.



$$x: F_8 - F_3' + F_7 \cdot \cos 45° = 0$$

$$F_8 = F_3' + F_7 \cdot \cos 45° = 500 + 707.107 \cdot \cos 45°,$$

$$F_8 = 1000N$$

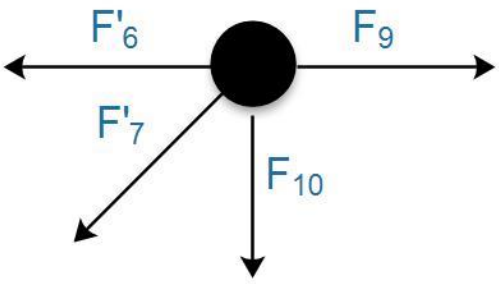
$$y: F_5' - F_7 \cdot \sin 45° = 0$$

$$F_7 = \frac{F_5'}{\sin 45°} = \frac{500}{\sin 45°}$$

$$F_7 = 707.107\ N$$

Слика 6.14. Систем сучељних сила за чвор 4

Сада је потребно извршити анализу сила у *Чвору 5*, при чему је шема сучељних сила приказана на слици 6.15.



$$x: F_9 - F_6' - F_7' \cdot \cos 45° = 0$$

$$F_9 = F_6' + F_7' \cdot \cos 45° = 500 + 707.107 \cdot \cos 45°,$$

$$F_9 = 1000N$$

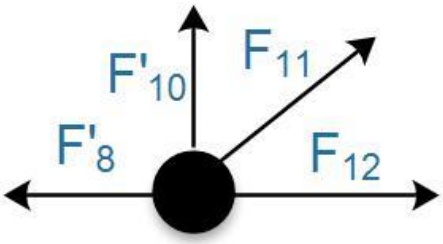
$$y: -F_{10} + F_7' \cdot \sin 45° = 0$$

$$F_{10} = F_7' \cdot \sin 45° = 707.107 \cdot \sin 45°,$$

$$F_{10} = 500N$$

Слика 6.15. Систем сучељних сила за чвор 5

Сада је потребно извршити анализу сила у *Чвору 6*, при чему је шема сучељних сила приказана на слици 6.16.



$$x: F_{12} - F_{11} \cdot \cos 45° - F_8' = 0$$

$$F_{12} = F_{11} \cdot \cos 45° + F_8' =$$

$$F_{12} = 132019.65N$$

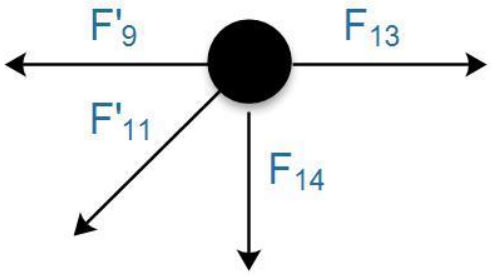
$$y: F_{10}' - F_{11} \cdot \sin 45° = 0$$

$$F_{11} = \frac{F_{10}'}{\sin 45°} = \frac{500}{\sin 45°},$$

$$F_{11} = 707.107N$$

Слика 6.16 Систем сучељних сила за чвор 6

Сада је потребно извршити анализу сила у *Чвору 7,* при чему је шема сучељних сила приказана на слици 6.17

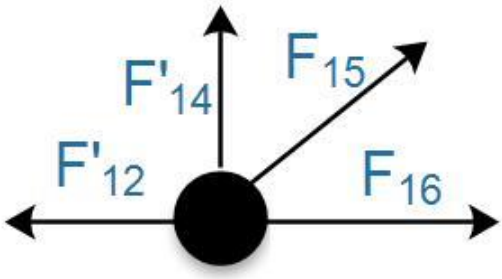


$$x: F_{13} - F_9' - F_{11}' \cdot \cos 45° = 0$$
$$F_{13} = F_9' + F_{11}' \cdot \cos 45°,$$
$$F_{13} = 1500N$$

$$y: F_{14} - F_{11}' \cdot \sin 45° = 0$$
$$F_{14} = F_{11}' \cdot \sin 45°,$$
$$F_{14} = 500N$$

Слика 6.17 Систем сучељних сила за чвор 7

Сада је потребно извршити анализу сила у *Чвору 8,* при чему је шема сучељних сила приказана на слици 6.18.

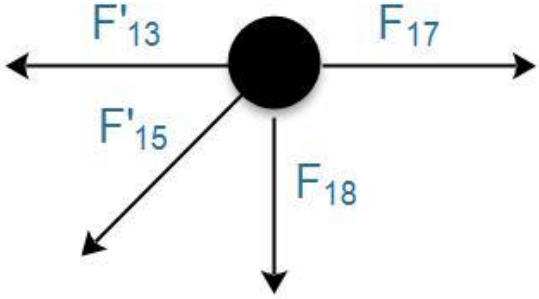


$$x: F_{16} + F_{15} \cdot \cos 45° - F_{12} = 0$$
$$F_{16} = F_{15} \cdot \cos 45° + F_{12}',$$
$$F_{16} = 2000N$$

$$y: F_{14}' + F_{15} \cdot \cos 45° = 0$$
$$F_{15} = \frac{F_{14}'}{\cos 45°},$$
$$F_{15} = 707.107\ N$$

Слика 6.18. Систем сучељних сила за чвор 8

Сада је потребно извршити анализу сила у *Чвору 9*, при чему је шема сучељних сила приказана на слици 6.18.

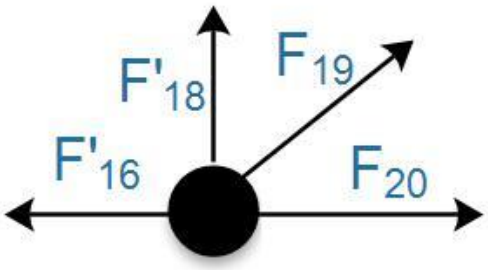


$$x: F_{17} - F_{13}' - F_{15}' \cdot \cos 45° = 0$$
$$F_{17} = F_{13}' + F_{15}' \cdot \cos 45°$$
$$F_{17} = 2000N$$

$$y: -F_{18} - F_{15} \cdot \sin 45° = 0$$
$$F_{18} = F_{15} \cdot \sin 45°,$$
$$F_{18} = 500N$$

Слика 6.18. Систем сучељних сила за чвор 9

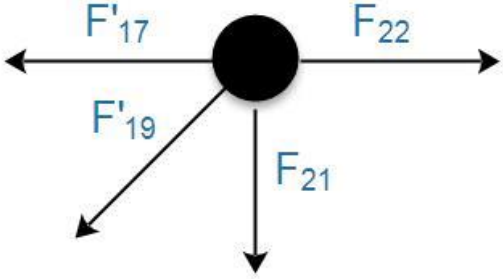
Сада је потребно извршити анализу сила у *Чвору 10*, при чему је шема сучељних сила приказана на слици 6.19



$$x: F_{20} + F_{19} \cdot \cos 45° - F'_{16} = 0$$
$$F_{20} = F_{19} \cdot \cos 45° + F'_{16},$$
$$F_{20} = 2500N$$
$$y: F_{19} \cdot \sin 45° + F'_{18} = 0$$
$$F_{19} = \frac{F'_{18}}{\sin 45°},$$
$$F_{19} = 707.107N$$

Слика 6.19. Систем сучељних сила за чвор 10

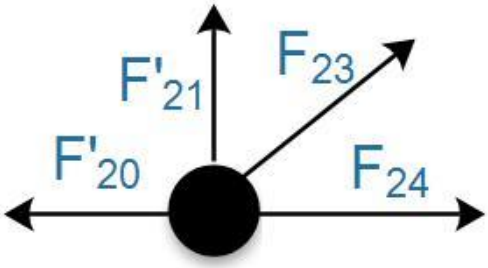
Сада је потребно извршити анализу сила у *Чвору 11*, при чему је шема сучељних сила приказана на слици 6.20



$$x: -F_{17}' + F_{22} - F_{19}' \cdot \cos 45° =$$
$$0\ F_{22} = F_{19}' \cdot \cos 45° + F_{17}',$$
$$F_{22} = 2500N$$
$$y: -F_{21} - F_{19} \cdot \sin 45° =$$
$$0\ F_{21} = F_{19} \cdot \sin 45°,$$
$$F_{21} = 500N$$

Слика 6.20. Систем сучељних сила за чвор 11

Сада је потребно извршити анализу сила у Чвору 12, при чему је шема сучељних сила приказана на слици 6.21.



$$x: F_{24} + F_{23} \cdot \cos 45° - F'_{20} = 0$$
$$F_{24} = F_{23} \cdot \cos 45° + F'_{20},$$
$$F_{24} = 3000N$$
$$y: F_{23} \cdot \sin 45° + F'_{21} = 0$$
$$F_{23} = \frac{F'_{21}}{\sin 45°},$$
$$F_{23} = 707.107N$$

Слика 6.21. Систем сучељних сила за чвор 12

За одређивање угиба израчунали смо вредности сила у 24 чвора и све то приказали у табели 3.3

Табела 3.3. Приказ сила у штаповима одређивањем угиба

Појас	**Дијагонална испуна**	**Вертикална испуна**
$F_2 = 0\ N$	$F_4 = 707.107\ N$	$F_1 = 0\ N$
$F_3 = 500\ N$	$F_7 = 707.107\ N$	$F_5 = 500\ N$
$F_6 = 500\ N$	$F_{11} = 707.107\ N$	$F_{10} = 500\ N$
$F_8 = 1000\ N$	$F_{15} = 707.107N$	$F_{14} = 500\ N$
$F_9 = 1000\ N$	$F_{19} = 707.107\ N$	$F_{18} = 500\ N$
$F_{12} = 1500\ N$	$F_{23} = 707.107\ N$	$F_{21} = 500\ N$
$F_{13} = 1500\ N$	$F_{27} = 707.107\ N$	$F_{26} = 500\ N$
$F_{16} = 2000\ N$	$F_{31} = 707.107\ N$	$F_{29} = 500\ N$
$F_{17} = 2000\ N$	$F_{35} = 707.107\ N$	$F_{33} = 500\ N$
$F_{20} = 2500\ N$	$F_{39} = 707.107\ N$	$F_{38} = 500\ N$
$F_{22} = 2500\ N$	$F_{43} = 707.107\ N$	$F_{42} = 500\ N$
$F_{24} = 3000\ N$	$F_{48} = 707.107\ N$	/
$F_{25} = 3000N$	/	/
$F_{28} = 3500\ N$	/	/
$F_{30} = 3500\ N$	/	/
$F_{32} = 4000\ N$	/	/
$F_{34} = 4000\ N$	/	/
$F_{36} = 4500\ N$	/	/
$F_{37} = 4500\ N$	/	/
$F_{40} = 5000\ N$	/	/
$F_{41} = 5000\ N$	/	/
$F_{44} = 5500\ N$	/	/
$F_{46} = 5500N$	/	/
$F_{47} = 6000\ N$	/	/

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[11],

$$1\ kN \cdot \Delta_{CV} = \sum \frac{n \cdot N \cdot l}{A \cdot E} \tag{6.38}$$

где су:

$1\ kN$ – виртуелно дејство које делује на решеткасту конструкцију,
Δ_{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 Мицрософт Ехцел израчунат је угиб решетке:

$$\Delta_{CV} = 88.6 + 7.31 + 2.57 = 98.46\ mm \tag{6.39}$$

Гранична вредност допуштеног угиба се може одредити на основу следећег обрасца[14]:

$$\delta = \frac{l}{125} = \frac{12500}{1250} = 100\ mm \tag{6.40}$$

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

6.3. Прорачун штапова који спајају раванске решетке

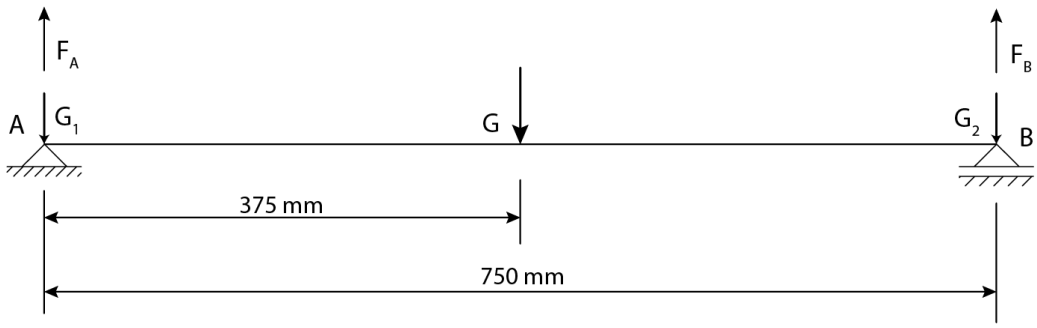
За претходни прорачун усваја се да профил 30x20x2 mm, чија је маса 1.52 kg/m. За анализирану конструкцију тежина профила износи[12]:

$$G_profila = 0.75 \cdot 1.52 \cdot 9.81 = 11.183\ N \tag{6.41}$$

Затим је потребно израчунати утицај тежине цеви, воде као и самог профила који спаја две раванске решетке. Прорачун је извршен за најоптерећенији штап на позицији G_2 на Слици 6.22. При одређивању овог дејства потребно је узети тежину цеви, воде и анализираног профила, остали фактори нису узети у обзир.

$$F = G_{cev} + G_{vode} + G_{profila} = 173.81 + 442.219 + 11.183 = 627.212\ N \tag{6.42}$$

На ослонце греде приказане на Слици 6.22. такође делује и тежина вертикалних испуна, која је једнака тежини $G_{profila}$.



Слика 6.22. Шематски приказ оптерећења најоптерећенијег штапа који спава две раванске решетке

$$M_A = 0 \Longrightarrow G_{profila} \cdot 0.75 + F \cdot \frac{0.75}{2} - F_A \cdot 0.75 = 0 \tag{6.43}$$

$$11.183 \cdot 0.75 + 627.212 \cdot \frac{0.75}{2} - F_A \cdot 0.75 = 0 \tag{6.44}$$

$$F_A = \frac{11.183 \cdot 0.75 + 627.212 \cdot \frac{0.75}{2}}{0.75} = 324.789\ N \tag{6.45}$$

Максимална вредност трансверзалне силе износи $F_{trans.max} = 313.606\ N$, док максимални момент савијања износи:

$$M_A = 313.606 \cdot \frac{0.75}{2} = 117.602\ Nm \tag{6.46}$$

Сада се може извршити провера на смицање коришћењем Еврокода 1993 1-1 стр. 57., [7].

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1.0 \tag{6.47}$$

$$V_{pl,Rd} = V_{c,Rd} = \frac{A_V \cdot (f_y/\sqrt{3})}{\gamma_{M0}} \tag{6.48}$$

Где је:

A_V – површина смицања.

За анализирани попречни пресек, површина смицања се израчунава:

$$A = 1.74\ cm^2 = 174\ mm^2$$

$$A_V = \frac{A \cdot h}{b+h} = \frac{174 \cdot 30}{30+20} = 104.4\ mm^2 \tag{6.49}$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{104.4 \cdot (235/\sqrt{3})}{1.1} = 12877.01\ N \tag{6.50}$$

$$\frac{313.606}{12877.01} = 0.024 \leq 1$$

Провера задовољава.

На основу греде може се одредити максимална вредност смицајне силе која износи

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1.0 \tag{6.51}$$

$$M_{pl,Rd} = V_{c,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1650 \cdot 235}{1.1} = 352500\ Nmm = 352.5\ Nm \tag{6.52}$$

$$W_{pl} = 1.65\ cm^3 = 1650\ mm^3$$

$$\frac{117.602}{352.5} = 0.334 \leq 1.0$$

Сада је потребно израчунати максималну вредност угиба. Пошто сличан случај не постоји у таблици угиба, усвојен је случај са концентрисаном силом у центру. За овај случај максимални угиб износи, [17]:

$$f = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot I} = \frac{627.212 \cdot 750^3}{48 \cdot 2.1 \cdot 10^5 \cdot 19400} = 1.353\ mm \tag{6.53}$$

Гранични угиб износи:

$$f = \frac{l}{300} = \frac{750}{300} = 2.167\ mm \tag{6.54}$$

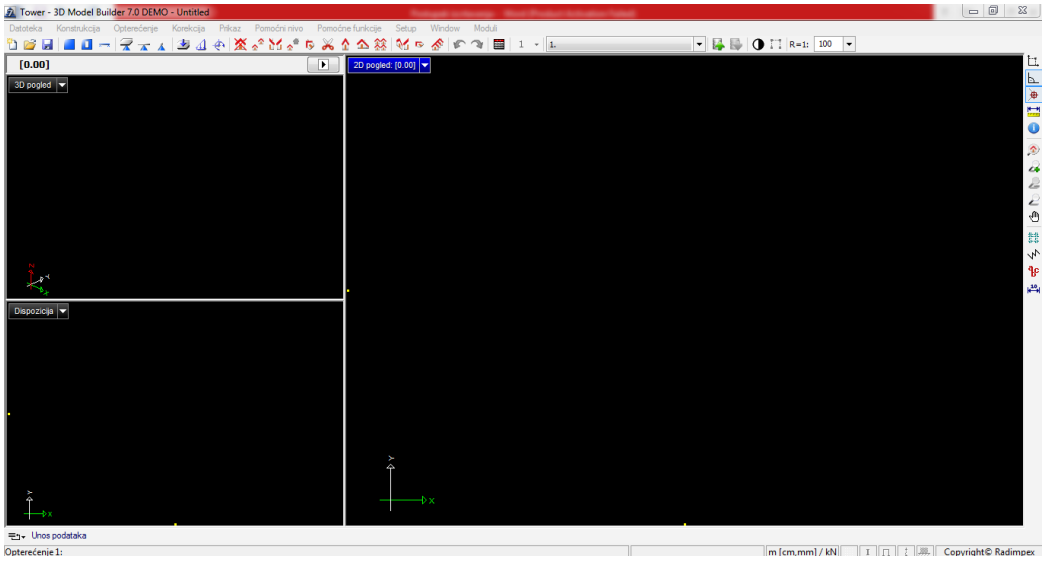
На основу добијених резултата може се рећи да је угиб мањи од критичног. Коначно се може рећи да изабрани профил задовољава све задате услове.

6.4. Решавање примера софтерским програмом *TOWER*

Towep 7, програм за статичку и динамичку анализу конструкција и димензионисање бетонских, челичних и дрвених елемената.

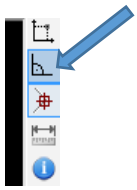
6.4.1. Приказивање поступка рада у софтеру

Приликом само стартовања софтера појављује нам се прозор тј радна провршина што је на слици 6.23.



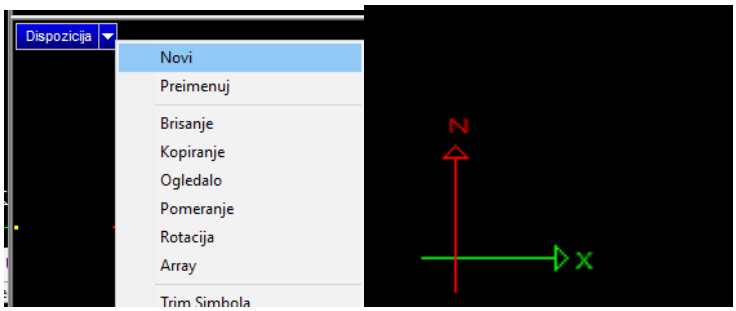
Слика 6.23 Радна површина

Након појављивања радне површине прво морамо да дефинишемо вертикалну раван у којој ћемо нацртати решетку. Опцијом OSNAP угасиш иконицу приказаној на слици 6.24



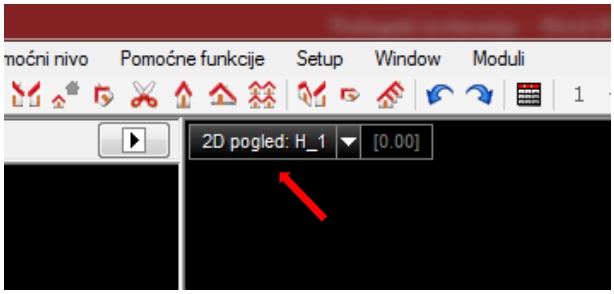
6.24. Опција OSNAP

Потом десним кликом на диспозицију отвараш падајуци мени на који кликеш десним кликом на “novo” где после у оквиру овог дела диспозиције нацрташ једну хоризоналну линију. Где се појаве после тога појаве у десном углу главна оса што је приказано на слици 6.25



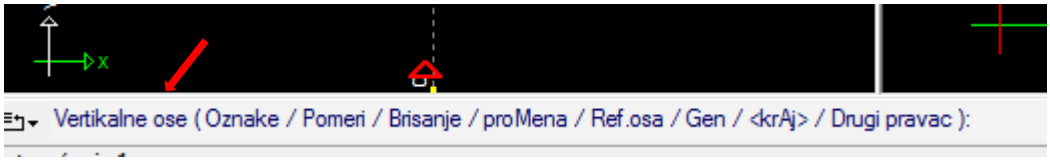
Слика 6.25. Мени диспозиције и главна оса

Кликом на 2D поглед прелазимо на десни део приказа у коме цемо да унесемо помоћну осу за исцртавање. У десно делу екрана налази се финкција OSE активирањем добијамо две осе приказано је на слици 6.26



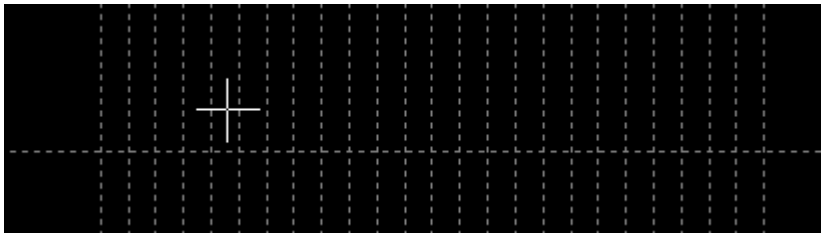
Слика 6.26. Приказ 2Д погледа

На дну екрана нам се налази опиција где уносимо колико вертикалних оса желимо приказано је на слици 6.27. у овом слуцају 24 тако да укуцамо 24*1.25 што нам је растојање које смо усвојими између решетки.



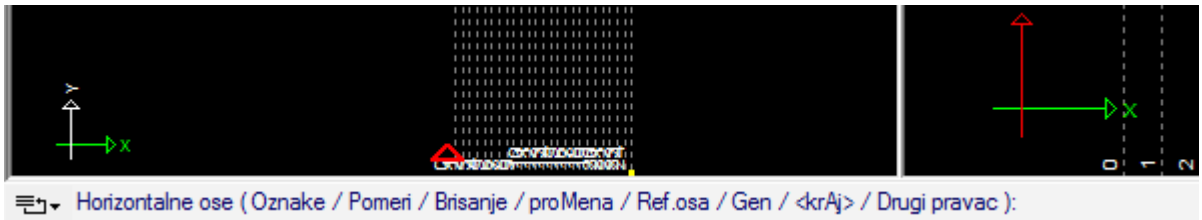
Слика 6.27. Задавање верктикалне осе

И добија се приказ оса које смо задали што се да видети на слици 6.28



Слика 6.28. Приказ добијених оси

Сада променимо правац оса у хоризонаталу и задајемо други правац тако што ћемо да укуцамо 1.25 који нам је приказано на слици 6.29.



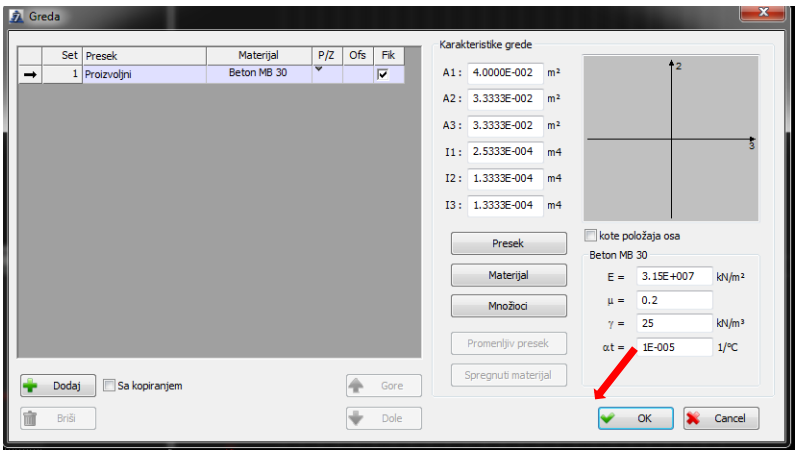
Слика 6.29. Задавање хоризанталне осе

Потребно је после генерисања оса да се дефинише носач, тако што кликнемо на иконицу у гоњем десном углу и доле ће да нам избаци поље где задајемо прву тачку греде

и идемо на опцију SET. Где нам се отвара прозор за дефинисање профила које ћемо користити.

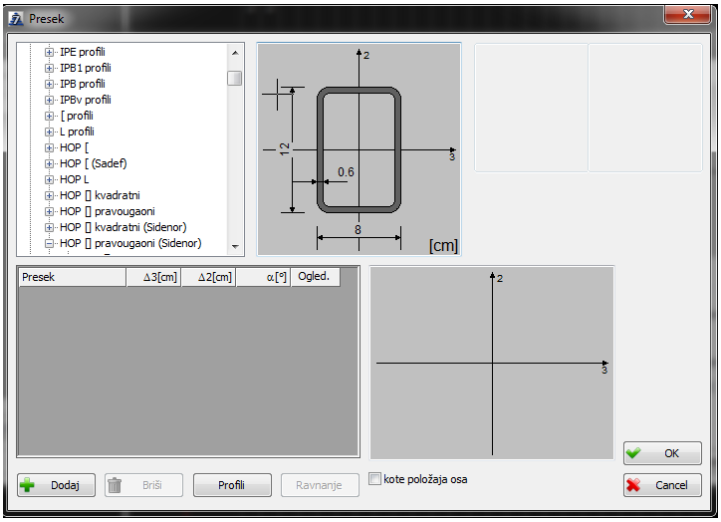
Слика 6.30. Опција SET

Отварањем протора ГРЕДА дефинисемо профил, материјал и и може да се виде све карактеристике тих профила. Кликом на опцију Материјал мењамо материјал приказано на слици 6.31 у челик.



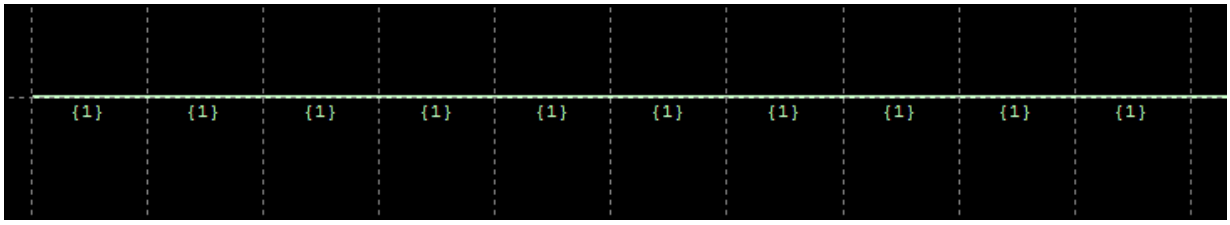
Слика 6.31. Мени дефинисања материјала

Кликом на опцију “Presek” отварамо прозор за одабир профила који смо усвојили у већ израчунатом алалитиком примеру и то је *HOP* pravugaoni *SIDENOR*, попречног пресека 120x80x6 који задовољава нашу конструкцију слика 6.32.



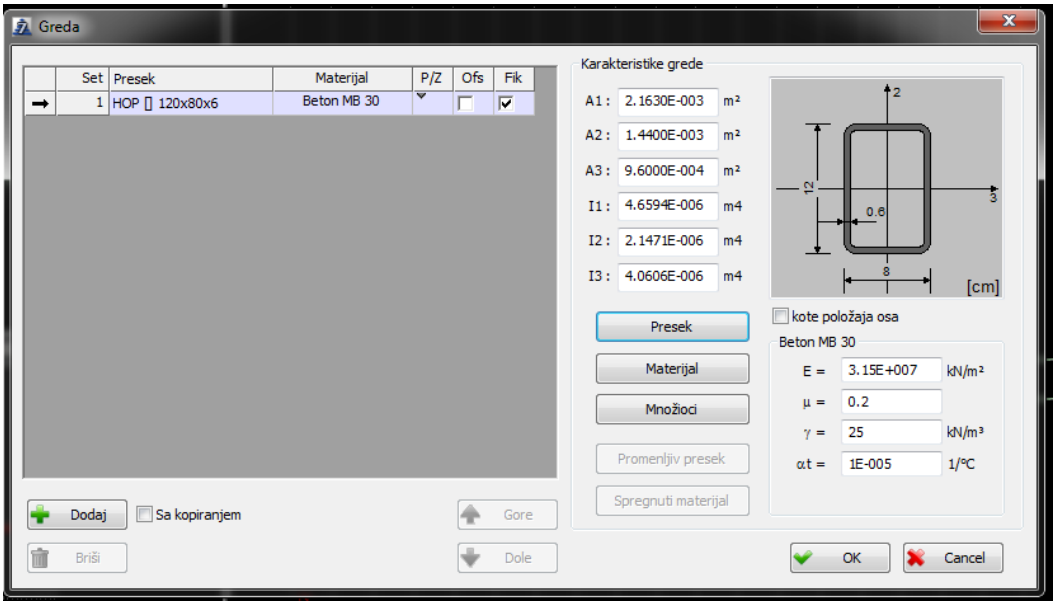
Слика 6.32. Дефинисање пресека профила

Када смо дефинисали профил укључујемо опцију OSE и крећемо да дефинишемо решетке од 1.25м у горњем и доњем појасу тако што идем од пресека до пресека задатих помоћних линија. Што је приказано на слици.



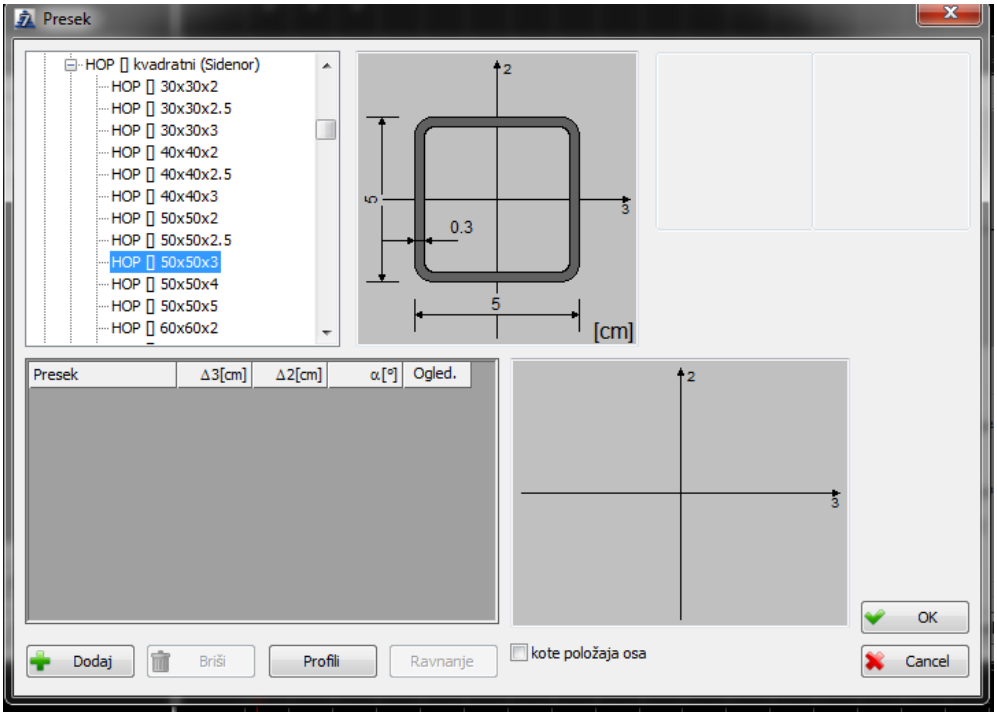
Слика 6.33. Приказ осе

Када смо завршили са цртањем горење и доњег појаса морамо да унесемо вертикалне и дијагоналне испуне, тако сто поново идемо на опцију SET где нам се отвара прозор где морамо да усовимо профил за вертикалну и дијагоналну испону као што се види на слици 6.34.



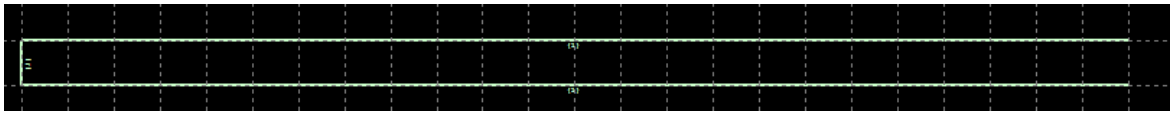
Слика 6.34. Уносење вредности за вертикалну и дијагоналну испону

Идемо кликом на пресек и дефинишемо испуну као код аналитичког примера 50x50x3, кликенмо на одговарајуци профил и кликом ОК потврђујемо.

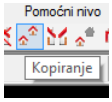


Слика 6.35. Попречни пресек испуне

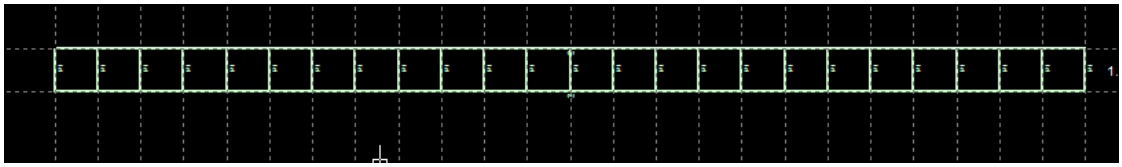
После задавања профила испуна враћамо се на цртање и нацртамо један вертикални штап горе и један доле и две вертикална појаса да би добио вертикални штап слика 6.36



Слика 6.36. Приказ бертикалног штапа

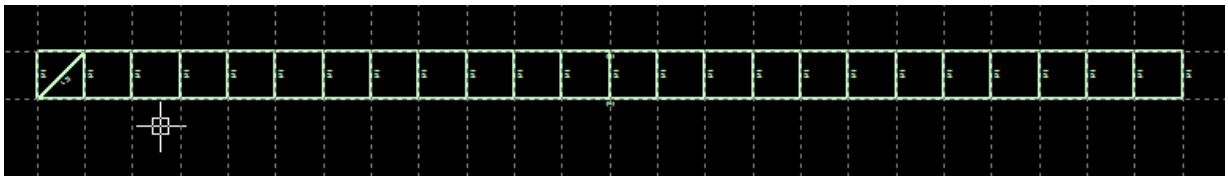
Активацијом иконице 

копирање можемо једноставним кликом да копирамо 24 штапа вертикалне испуне уместо цртања појединацно сваке, копирамо тако што помножимо 24 штапа са растојањем 1.25м и добијемо решеткасту конструкцију слика 6.37,



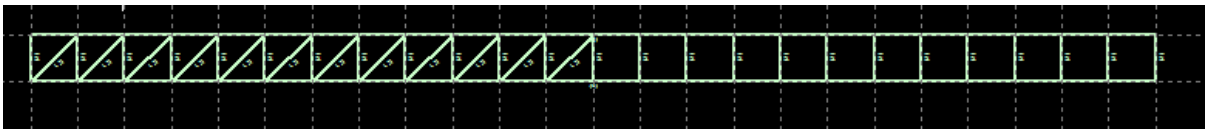
Слика 6.37.Приказ бертикалних испуна

Након тога цртамо дијагонале опет кликом на греду и спојиш у првом квадрадту леву и десну дијагоналу што се види на слици 6.38.



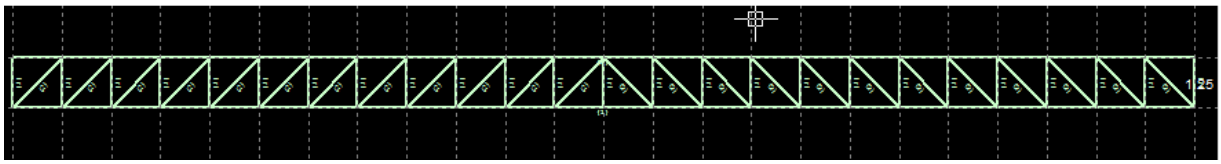
Слика 6.38. Приказ једне дијагоналне испуне

Истим принципом копирања добијемо и добијемо дијагоналене испуне до пола решетке слика 6.39,



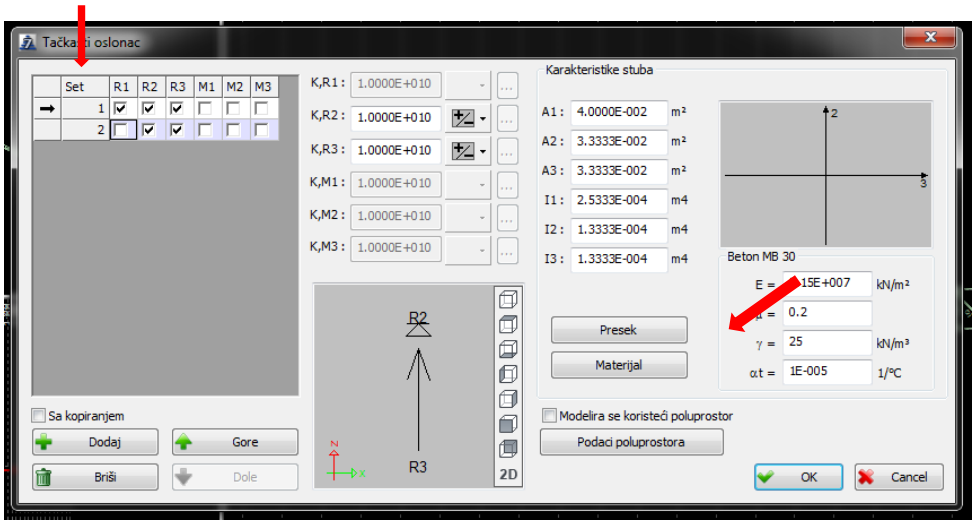
Слика 6.39. Приказ дијагоналних испуна

и исто нацртамо остале дијагонале обрнуто јер смо тако задали у аналитичком примеру,



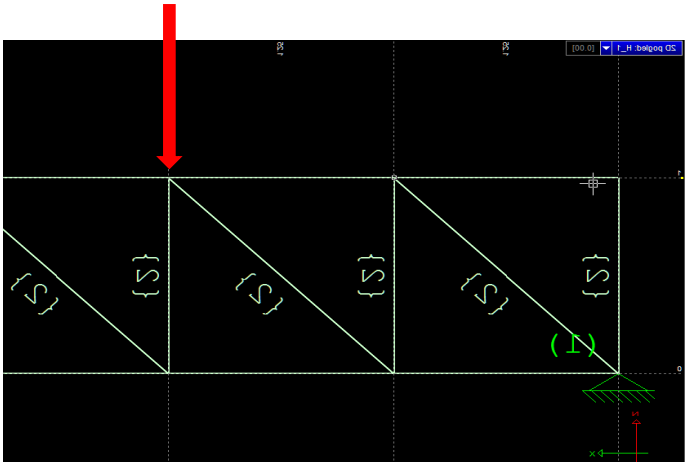
Слика 6.40 Решетласт носач

Када смо нацртали решетку требамо да задамо ослонце тако што килом на иконицу *Tackasti oslonac*. Отворимо прозор и кликом на SET отварамо поље где ћемо да унесемо леви и десни ослонац када унесемо кликнемо на OK слика 6.41.



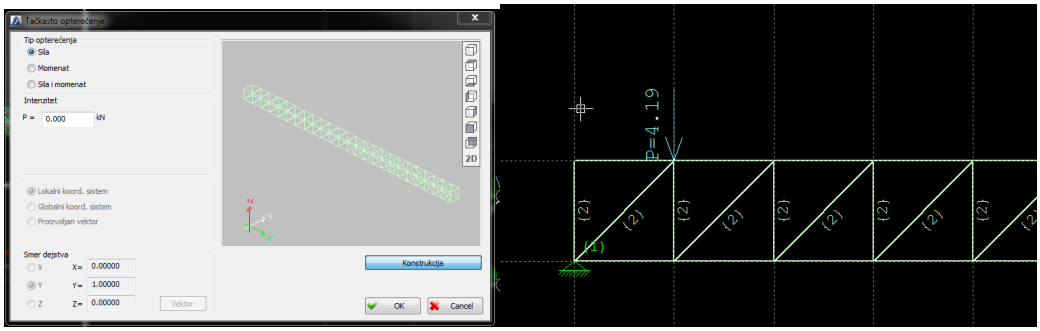
Слика 6.41. Тачкасти ослонац

Кликом на иконицу тачкасто оптерећење морамо да селектујемо тачку на којој се нанаси оптерећење и то ће бити тачка на споју дијагоналног и вертикалног штапа слика 6.41.



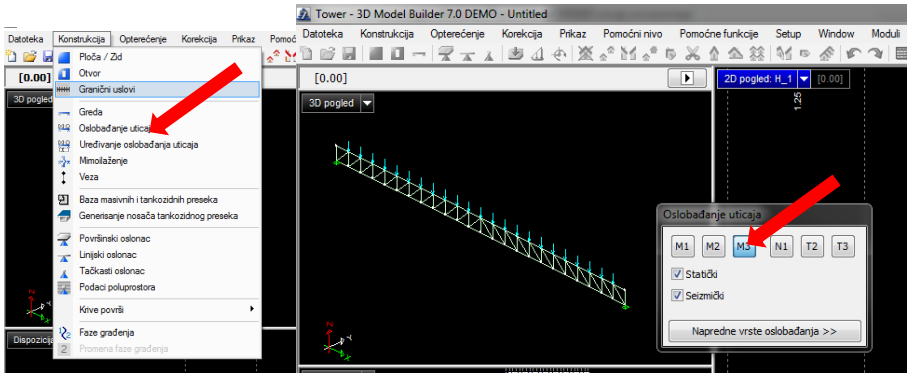
Слика 6.42 Приказ силе у тачкастом оптерећењу

Пошто смо селектовали тачку отвара на порзор да задамо силу, уносимо вредност силе која ће да нам делује по Y – оси са предзнаком минус да би добили правац силе која нам делује на решетку. На слици 6.43 је приказан правац силе као и њено задато оптерећење. Овај поступак понављамо на сваком чвору у горњем појасу 22 пута.



Слика 6.43 Задавање силе и правац силе на решетки

Кликом на падајући мени *Конструкција* клинемо на опцију *ослобађање утицаја* где нам се појави прозор са опцијама M1, M2, M3, левим кликом на M3 да па га активираш и онда кликнеш у сваки чвор решетке слика 6.44.

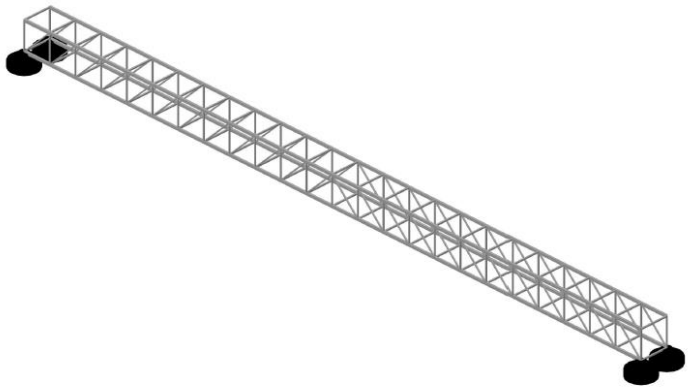


Слика 6.44. Ослобађање утицаја

Завршили смо дефинисањем решетке сада покрећемо Модули, па на опцију формирање мреже, када активирамо идемо на опцију Прорачун, где нам се порачун конструкције обрадити и после очитавамо утицаје решетке.

6.4.2 Обрађени подаци u TOWER-у

6.4.2.1. Просторна решетка



Слика 6.46. Приказ 3Д ресетке у програму Tower

Табела 6.6 Улазни подаци задавање попречних пресека профила

Ulazni podaci - Konstrukcija

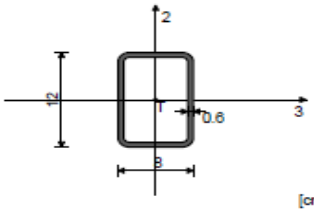
Tabela materijala

No	Naziv materijala	E[kN/m2]	μ	γ[kN/m3]	αt[1/C]	Em[kN/m2]	μm
1	Celik	2.100e+8	0.30	78.50	1.000e-5	2.100e+8	0.30

Setovi greda

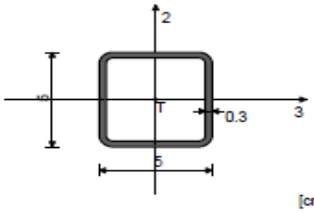
Set: 1 Presek: HOP [] 120x80x6, Fiktivna ekscentričnost

Mat.	A1	A2	A3	I1	I2	I3
1 - Celik	2.163e-3	1.440e-3	9.600e-4	4.659e-6	2.147e-6	4.061e-6



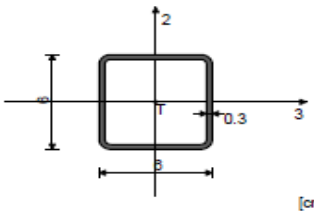
Set: 2 Presek: HOP [] 50x50x3, Fiktivna ekscentričnost

Mat.	A1	A2	A3	I1	I2	I3
1 - Celik	5.410e-4	3.000e-4	3.000e-4	3.197e-7	1.851e-7	1.851e-7



Set: 3 Presek: HOP [] 60x60x3, Fiktivna ekscentričnost

Mat.	A1	A2	A3	I1	I2	I3
1 - Celik	6.610e-4	3.600e-4	3.600e-4	5.689e-7	3.392e-7	3.392e-7



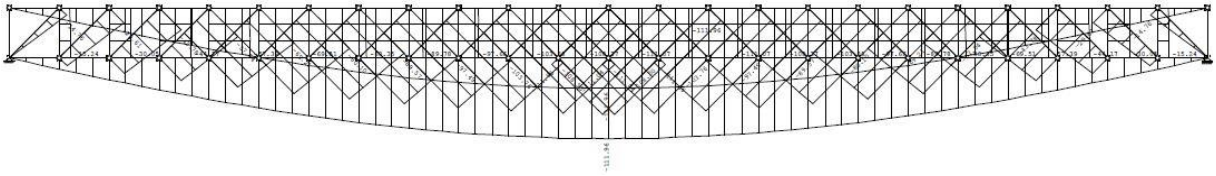
Табела 6.7. Тачкаста оптерећења у сваком чвору

Tačkasta opterećenja										
No	LC	X [m]	Y [m]	Z [m]	Px [kN]	Py [kN]	Pz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]
1	1	1.2500	2.5000	1.2500			-4.1911			
2	1	1.2500	1.2500	1.2500			-4.1911			
3	1	2.5000	2.5000	1.2500			-4.1911			
4	1	2.5000	1.2500	1.2500			-4.1911			
5	1	3.7500	2.5000	1.2500			-4.1911			
6	1	3.7500	1.2500	1.2500			-4.1911			
7	1	5.0000	2.5000	1.2500			-4.1911			
8	1	5.0000	1.2500	1.2500			-4.1911			
9	1	6.2500	2.5000	1.2500			-4.1911			
10	1	6.2500	1.2500	1.2500			-4.1911			
11	1	7.5000	2.5000	1.2500			-4.1911			
12	1	7.5000	1.2500	1.2500			-4.1911			
13	1	8.7500	2.5000	1.2500			-4.1911			
14	1	8.7500	1.2500	1.2500			-4.1911			
15	1	10.000	2.5000	1.2500			-4.1911			
16	1	10.000	1.2500	1.2500			-4.1911			
17	1	11.250	2.5000	1.2500			-4.1911			
18	1	11.250	1.2500	1.2500			-4.1911			
19	1	12.500	2.5000	1.2500			-4.1911			
20	1	12.500	1.2500	1.2500			-4.1911			
21	1	13.750	2.5000	1.2500			-4.1911			
22	1	13.750	1.2500	1.2500			-4.1911			
23	1	15.000	2.5000	1.2500			-4.1911			
24	1	15.000	1.2500	1.2500			-4.1911			
25	1	16.250	2.5000	1.2500			-4.1911			
26	1	16.250	1.2500	1.2500			-4.1911			
27	1	17.500	2.5000	1.2500			-4.1911			
28	1	17.500	1.2500	1.2500			-4.1911			
29	1	18.750	2.5000	1.2500			-4.1911			
30	1	18.750	1.2500	1.2500			-4.1911			
31	1	20.000	2.5000	1.2500			-4.1911			
32	1	20.000	1.2500	1.2500			-4.1911			
33	1	21.250	2.5000	1.2500			-4.1911			
34	1	21.250	1.2500	1.2500			-4.1911			
35	1	22.500	2.5000	1.2500			-4.1911			
36	1	22.500	1.2500	1.2500			-4.1911			
37	1	23.750	2.5000	1.2500			-4.1911			
38	1	23.750	1.2500	1.2500			-4.1911			
39	1	25.000	2.5000	1.2500			-4.1911			
40	1	25.000	1.2500	1.2500			-4.1911			
41	1	26.250	2.5000	1.2500			-4.1911			
42	1	26.250	1.2500	1.2500			-4.1911			
43	1	27.500	2.5000	1.2500			-4.1911			
44	1	27.500	1.2500	1.2500			-4.1911			
45	1	28.750	2.5000	1.2500			-4.1911			
46	1	28.750	1.2500	1.2500			-4.1911			

Табела 6.8. Статички прорачун

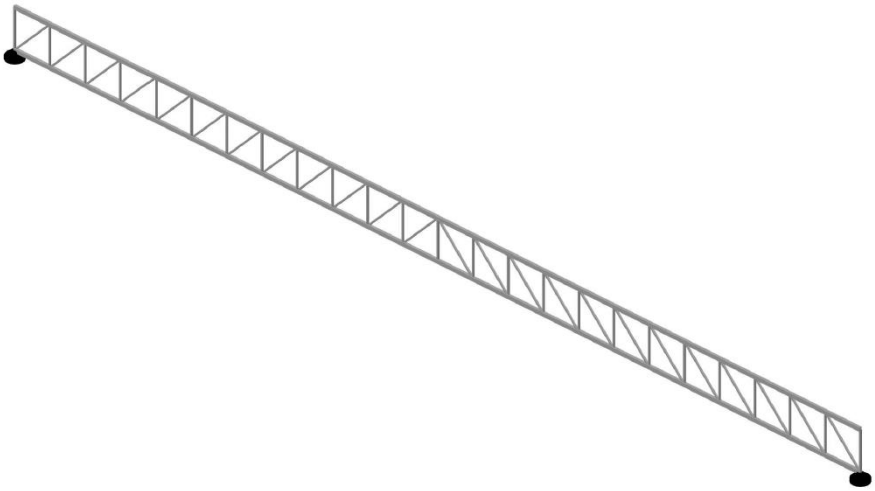
Statički proračun

Presečne sile u gredama - Ekstremne vrednosti - Opterećenje: 1						
Oznaka	LC	x [m]	N1 [kN]	T2 [kN]	M2 [kNm]	M3 [kNm]
(42 - 48)	1	1.250	|301.76|	0.000	0.000	0.000
(45 - 51)	1	1.250	|301.76|	0.000	0.000	0.000
(51 - 55)	1	1.250	|301.76|	0.000	0.000	0.000
(48 - 52)	1	1.250	|301.76|	0.000	0.000	0.000
(53 - 57)	1	1.250	|-299.66|	0.000	0.000	0.000
(50 - 53)	1	1.250	|-299.66|	0.000	0.000	0.000
(41 - 45)	1	1.250	|299.66|	0.000	0.000	0.000
(46 - 49)	1	1.250	|-299.66|	0.000	0.000	0.000
(52 - 56)	1	1.250	|299.66|	0.000	0.000	0.000
(55 - 59)	1	1.250	|299.66|	0.000	0.000	0.000
(4 - 6)	1	1.250	48.198	|-0.157|	0.000	0.000
(95 - 99)	1	1.250	48.198	|0.157|	0.000	-0.197
(1 - 2)	1	1.250	48.198	|-0.157|	0.000	0.000
(92 - 96)	1	1.250	48.198	|0.157|	0.000	-0.197
(100 - 99)	1	1.250	0.000	|-0.110|	0.000	0.138
(3 - 1)	1	1.250	0.000	|0.110|	0.000	-0.138
(7 - 4)	1	1.250	0.000	|0.110|	0.000	-0.138
(98 - 96)	1	1.250	0.000	|-0.110|	0.000	0.138
(99 - 97)	1	1.768	-67.972	|0.033|	0.000	0.000
(4 - 11)	1	1.768	-67.972	|0.033|	0.000	0.000
(4 - 6)	1	0.000	48.198	-0.157	0.000	|-0.197|
(95 - 99)	1	1.250	48.198	0.157	0.000	|-0.197|
(1 - 2)	1	0.000	48.198	-0.157	0.000	|-0.197|
(92 - 96)	1	1.250	48.198	0.157	0.000	|-0.197|
(100 - 99)	1	1.250	0.000	-0.110	0.000	|0.138|
(3 - 1)	1	1.250	0.000	0.110	0.000	|-0.138|
(7 - 4)	1	1.250	0.000	0.110	0.000	|-0.138|
(98 - 96)	1	1.250	0.000	-0.110	0.000	|0.138|
(99 - 97)	1	0.000	-67.972	0.033	0.000	|0.058|
(4 - 11)	1	0.000	-67.972	0.033	0.000	|0.058|



Слика 6.47. Угби просторне решетке

6.4.2.2. Раванска решетка



Слика 6.48. Приказ 3Д раванске ресетке у програму Tower

Табела 6.9. Улазни подаци

Ulazni podaci - Konstrukcija, Ulazni podaci - Opterećenje

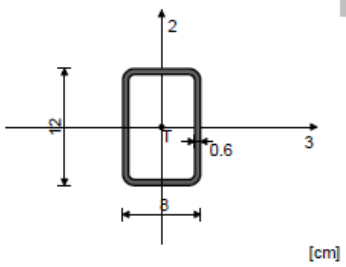
Tabela materijala

No	Naziv materijala	E[kN/m2]	μ	γ[kN/m3]	αt[1/C]	Em[kN/m2]	μm
1	Celik	2.100e+8	0.30	78.50	1.000e-5	2.100e+8	0.30

Setovi greda

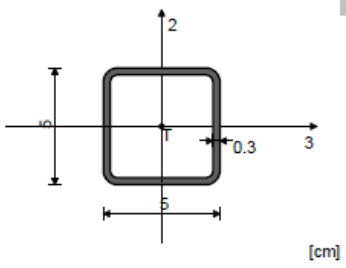
Set: 1 Presek: HOP [] 120x80x6, Fiktivna ekscentričnost

Mat.	A1	A2	A3	I1	I2	I3
1 - Celik	2.163e-3	1.440e-3	9.600e-4	4.659e-6	2.147e-6	4.061e-6



Set: 2 Presek: HOP [] 50x50x3, Fiktivna ekscentričnost

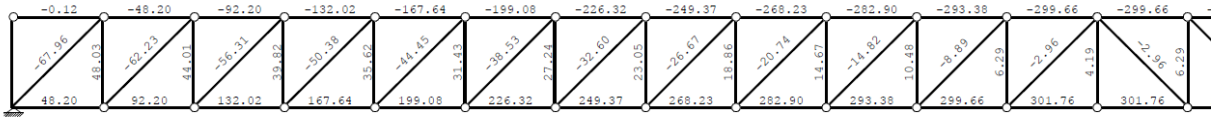
Mat.	A1	A2	A3	I1	I2	I3
1 - Celik	5.410e-4	3.000e-4	3.000e-4	3.197e-7	1.947e-7	1.947e-7



Табела 6.10. Приказ тачкастог оптерећења раванске решетке у TOWER-у

Setovi tačkastih oslonaca						
	K,R1	K,R2	K,R3	K,M1	K,M2	K,M3
1	1.000e+10	1.000e+10	1.000e+10			
2		1.000e+10	1.000e+10			

Tačkasta opterećenja										
No	LC	X [m]	Y [m]	Z [m]	Px [kN]	Py [kN]	Pz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]
1	1	1.2500	-1.3605	0.0000			-4.1911			
2	1	2.5000	-1.3605	0.0000			-4.1911			
3	1	28.750	-1.3605	0.0000			-4.1911			
4	1	27.500	-1.3605	0.0000			-4.1911			
5	1	26.250	-1.3605	0.0000			-4.1911			
6	1	25.000	-1.3605	0.0000			-4.1911			
7	1	23.750	-1.3605	0.0000			-4.1911			
8	1	22.500	-1.3605	0.0000			-4.1911			
9	1	21.250	-1.3605	0.0000			-4.1911			
10	1	20.000	-1.3605	0.0000			-4.1911			
11	1	18.750	-1.3605	0.0000			-4.1911			
12	1	17.500	-1.3605	0.0000			-4.1911			
13	1	16.250	-1.3605	0.0000			-4.1911			
14	1	15.000	-1.3605	0.0000			-4.1911			
15	1	13.750	-1.3605	0.0000			-4.1911			
16	1	12.500	-1.3605	0.0000			-4.1911			
17	1	11.250	-1.3605	0.0000			-4.1911			
18	1	10.0000	-1.3605	0.0000			-4.1911			
19	1	8.7500	-1.3605	0.0000			-4.1911			
20	1	7.5000	-1.3605	0.0000			-4.1911			
21	1	6.2500	-1.3605	0.0000			-4.1911			
22	1	5.0000	-1.3605	0.0000			-4.1911			
23	1	3.7500	-1.3605	0.0000			-4.1911			



Слика 6.48. Приказ сила у сваком штапу

Табела 6.11. Приказ сила у гредама у равансој решетки

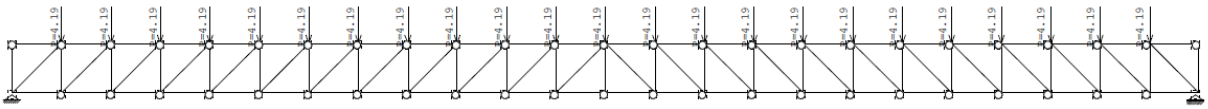
Statički proračun

Presečne sile u gredama - Ekstremne vrednosti - Opterećenje: 1						
Oznaka	LC	x [m]	N1 [kN]	T2 [kN]	M2 [kNm]	M3 [kNm]
(23 - 25)	1	1.250	**|301.76|**	0.000	0.000	0.000
(25 - 27)	1	1.250	**|301.76|**	0.000	0.000	0.000
(24 - 26)	1	1.250	**|-299.66|**	0.000	0.000	0.000
(27 - 29)	1	1.250	**|299.66|**	0.000	0.000	0.000
(21 - 23)	1	1.250	**|299.66|**	0.000	0.000	0.000
(26 - 28)	1	1.250	**|-299.66|**	0.000	0.000	0.000
(29 - 31)	1	1.250	**|293.38|**	0.000	0.000	0.000
(19 - 21)	1	1.250	**|293.38|**	0.000	0.000	0.000
(22 - 24)	1	1.250	**|-293.38|**	0.000	0.000	0.000
(28 - 30)	1	1.250	**|-293.38|**	0.000	0.000	0.000
(1 - 3)	1	1.250	48.198	**|-0.169|**	0.000	0.000
(47 - 49)	1	1.250	48.198	**|0.169|**	0.000	-0.212
(2 - 1)	1	1.250	0.000	**|0.119|**	0.000	-0.148
(50 - 49)	1	1.250	0.000	**|-0.119|**	0.000	0.148
(1 - 4)	1	1.768	-67.958	**|0.036|**	0.000	0.000
(49 - 48)	1	1.768	-67.958	**|0.036|**	0.000	0.000
(1 - 3)	1	0.000	48.198	-0.169	0.000	**|-0.212|**
(47 - 49)	1	1.250	48.198	0.169	0.000	**|-0.212|**
(2 - 1)	1	1.250	0.000	0.119	0.000	**|-0.148|**
(50 - 49)	1	1.250	0.000	-0.119	0.000	**|0.148|**
(1 - 4)	1	0.000	-67.958	0.036	0.000	**|0.063|**
(49 - 48)	1	0.000	-67.958	0.036	0.000	**|0.063|**

Uticaji u tačkastim osloncima - Ekstremne vrednosti - Opterećenje: 1							
Oznaka	LC	R1 [kN]	R2 [kN]	R3 [kN]	M1 [kNm]	M2 [kNm]	M3 [kNm]
1	1	0.000	0.000	**|48.198|**	*	*	*
49	1	*	0.000	**|48.198|**	*	*	*

Deformacija čvorova: max. |Zp|				
Cvor	LC	Xp [mm]	Yp [mm]	Zp [mm]
25	1	46.980	0.000	**-750.10**
26	1	46.980	0.000	**-749.80**
27	1	52.516	0.000	**-743.83**
23	1	41.444	0.000	**-743.83**
28	1	41.482	0.000	**-743.36**

Čvor	LC	Xp [mm]	Yp [mm]	Zp [mm]
24	1	52.478	0.000	**-743.36**
21	1	35.946	0.000	**-725.53**
29	1	58.014	0.000	**-725.53**
22	1	57.860	0.000	**-724.76**
30	1	36.100	0.000	**-724.76**



Слика 6.49. Прикано деловање сила у горњој испуни

6.5. Прорачун 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.

Иако се графички може уочити да долази до преклопа појасних профила, овај профил се у литератури може наћи под ознаком *КТ*. Пошто се у Еврокодовима не може наћи одговарајући прорачун за *КТ* спојеве, прорачун је извршен на основу израза за *Т* везу, *ЕС 1993 1-8 стр. 129.*, [15].Коначно је извршена провера на основу обрасца за *К* и *N* везу са размаком.

Првенствено је потребно задовољити услов:

$$N_{Ed} \leq N_{i,Rd} \tag{6.55}$$

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 $D_1 = 9023.998\ N$ и $V_2 = 6380.930\ N$. Сада је потребно одредити прорачунску вредност.

$$N_{i,Rd} = \frac{k_n \cdot f_{y0} \cdot {t_0}^2}{(1-\beta) \cdot \sin\theta_1} \cdot \frac{\left(\frac{2 \cdot \beta}{\sin\theta_1} + 4 \cdot (1-\beta)^{0.5}\right)}{\gamma_{M5}} \tag{6.56}$$

где су:

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

f_{y0} – граница развлачења појасног елемента,

θ_1 – угао између елемената испуне и и појаса

β – однос ширине елемента испуне и појасног елемента

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

$$\beta = \frac{b_1}{b_0} = \frac{20}{30} = 0.667 \tag{6.57}$$

Усваја се да фактор k_n износи, $k_n = 1.0$.

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

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

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

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

$$N_{i,Rd} = 16745.981\ N \tag{6.58}$$

$$N_{i,Ed} \leq N_{i,Rd};\ \ 9023.998\ N < 16745.981\ N$$

Изабрани тип завареног споја пружа довољну чврстоћу конструкцији. Сада је потребно извршити прорачун дијагоналне испуне.

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

$$N_{i,Rd} = 10281.415\ N \tag{6.58}$$

$$N_{i,Ed} \leq N_{i,Rd};\ \ 6380.930\ N < 10281.415\ N$$

Изабрани тип завареног споја пружа довољну чврстоћу конструкцији. Сада је извршена провера добијених резултата на основу израза за прорачун K и N шавова са размаком.

$$N_{i,Rd} = \frac{8.9 \cdot \gamma^{0.5} \cdot k_n \cdot f_{y0} \cdot {t_0}^2}{\sin \theta_i} \cdot \frac{\left(\frac{b_1 + b_2}{2 \cdot b_0}\right)}{\gamma_{M5}} \tag{6.60}$$

где су:

γ - однос ширине или пречника појаса и двоструке дебљине зида његовог попрећног пресека,

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

f_{y0} – граница развлачења појасног елемента,

θ_i – угао између елемената испуне и и појаса,

b_1, b_2, b_0 – димензије одговарајућих профила.

γ_{M5} – носивост веза код решеткастих носача од шупљих профила.

$$\gamma = \frac{b_0}{2 \cdot t_0} = \frac{30}{2 \cdot 2} = 7.5 \tag{6.61}$$

t_0 – дебљина појасног профила.

Усваја се да фактор k_n износи, $k_n = 1.0$..

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

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

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

За дијагоналну испуну прорачунска вредност носивости износи:

$$N_{i,Rd} = \frac{8.9 \cdot 7.5^{0.5} \cdot 1 \cdot 235 \cdot 2^2}{\sin 45°} \cdot \left(\frac{20 + 20}{2 \cdot 30}\right) / 1.0$$

$$N_{i,Rd} = 21600.919\ N \tag{6.62}$$

$$N_{i,Ed} \leq N_{i,Rd};\ \ 9023.998\ N < 21600.919\ N$$

Дијагонална испуна задивољава проверу.

За вертикалну испуну прорачунска вредност носивости износи:

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

$$N_{i,Rd} = 15274.156\ N \tag{6.53}$$

$$N_{i,Ed} \leq N_{i,Rd};\ \ 6380.930\ N < 21600.919\ N$$

7. ЗАКЉУЧАК

Решеткасти носачи имају највећу примену у грађевини, мосоградњи и железничком саобраћају. Предности решеткасти носача су мала тежина, мања висина, велика крутост (мале деформације), могућност серијске (индустријске) производње, могућност прерасподеле утицаја након евентуалног локалног губитка носивости, већа отпорност на дејство пожара, велике могућности конструкцијског обликовања лака и брза монтажа и естетске предности;

У овом примеру смо користили шупље профиле за задату решеткасту конструкцију у којој спадају решеткасте носаче без чворног лима. Везе у чворовима се остварују директим заваривањем или завареним спојем. Предности у односу на класичне решеткасте носаче: мања тежина, јефтинија антикозивна заштита, повољнији аеродинамички облик и велике могнићности конструктерског и архитектонског обликовања. Израђују се од шупљих профила кружног попречног пресека и шупљих профила квадратног или правоугаоног пресека

Након обраде података које смо обрадили аналитички и нумерички помоћу програмског софтера TOWER. Towep је програм за свеобухватну анализу утицаја у раванским и просторним конструкцијама. Обезбеђујући снажне алате који су аутоматизовани, интегрисани, свеобухватни и интуитивни, овај програм омогућава инжењерима повећање брзине и квалитета пројектовања. Radimpex Software је компанија која је основана 1989. године, и од тада се искључиво бави развојем софтвера у области грађевинарства. Оријентација фирме је поред прављења нових програма и усавршавање постојећих како би се стално пратили нови захтеви у области компјутерских програма. Бавећи се низ година овим проблемом, наши програми за пројектовање конструкција, постали су међу најбољима у свету.

Можемо закључити да је много лакше обрадити помоћу софтера, јер нам уштеди време које нам је потребно за рачуњање сваког чвора у задатој решетки. Такође бржа обрада података што је и престаљено у овом раду. Данас се све више користе различити софтери који могу обрадити решеткасте носаче, због брзине решавања проблема .

У примеру који смо одрадили преглед метода аналитичке и нумеричке којом смо одрадили на примеру. Упоређивањем резултата добили смо да је разлика од 1kN, што у нашем случај је занемарено због силе која оптерећује штап.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Инес Ромић, Графички поступци решавања раванских решеткастих носача, Грађевински факултет Загреб, 2016

[2] С.П.Тимошенко, Д.Х.Јанг, Теорија конструкција, Грађевинска књига,Београд 1968,

[3] М.Ђурић, О. Ђурић-Перић, Статика конструкција, Грађевинска књига а.д. Београд 2007

[4] И.П.Прокофијев, Теорија конструкција I, II и III, Грађевинска књига, Београд 1966,

[5] Метода коначних елемената; доступна на интернет адреси http://am.unze.ba/mkpr/MKE%201. pdf, (01.07.2017)

[7] Еврокод ЕС 1993-1-1:2005, Грађевински факултет Универзитета у Београду, Јун 2017.

[8] О Порграму Tower 7 доступна на интернет адреси, (07.08.2017) http://www.radimpex.rs/about.php?lang=sr&id=1,

[9] Упоредна таблица челика, доступна на интернет адреси (07.06.2017.): хттп://www.стеелсервицецентер.цо.рс/целици.пхп

[10] Еврокод ЕС 1991-1-3:2003, Грађевински факултет Универзитет у Београду, Новембар 2009.

[11] Еврокод ЕС 1991-1-4:2005, Грађевински факултет Универзитет у Београду, Новембар 2009.

[12] Таблица стандардних кутијастих профила преузета је са интернет адресе (07.06.2017.):

https://www.voestalpine.com/krems/static/sites/c021/downloads/de/broschueren/VAKR_VHP-TD_DE_EN.pdf

[13] Понуда кутијастих профила компаније Атениц Цоммерце из Чачка, доступна на интернет адреси (07.06.2017.): http://www.atenic-commerce.com/cevi.html#savne-cevi

[14] Предавања и вежбе предмета Отпорност материјала на Факултету Инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

[15] Еврокод ЕС 1993-1-8:2005, Грађевински факултет Универзитет у Београду, Фебруар 2006.

[16] *Mechanics of Materials 8th edition*, Russell C. Hibbeler, Април 2010.

[17] Предавања и вежбе предмета Компјутерска анализа конструкција на Факултету Инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу