

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Машинске конструкције и механизација

Предмет: Металне конструкције

Број индекса: 17/2017

Милица Б. Радојичић

Пројектовање једне лаке металне конструкције коришћењем савремених софтвера и Еврокод стандарда

завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Весна Марјановић, ред. проф. - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

Најсрдачније и најискреније се захваљујем свом ментору проф. др Весни Марјановић на разумевању, несебичној помоћи током израде овог завршног рада, као и на веома корисним и искреним саветима који су утицали на квалитет рада.

Такође, велику захвалност дугујем својој породици и пријатељима који су ме подржавали и мотивисали током студија и који су ми дали снаге да дам све од себе.

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да да детаљан преглед начина пројектовања носача у металним конструкцијама. Посебан осврт треба да буде на лаким металним конструкцијама и пуним лименим носачима и на начину њиховог пројектовања, прорачуна напона и деформација као и провери стабилности према најновијим европским стандардима. На самом крају рада потребно је урадити пример конструкције и прорачун једног завареног лименог носача.

Препоручена литература:

- [1] Буђевац Д., Марковић З. и др., Металне конструкције, Грађевинска књига, Београд, 2007.
- [2] Петковић З., Острић Д., Металне конструкције у машиноградњи 1, Институт за механизацију Машинског факултета у Београду, Београд, 1996.
- [3] Николић Р., Марјановић В., Металне конструкције – Приручник за прорачуне, Машински факултет, Крагујевац, 1998.
- [4] Николић Р., Вељковић Ј., Марјановић В., Металне конструкције – збирка решених задатака, Машински факултет, Крагујевац, 2013.

РЕЗИМЕ

Тема овог рада базира се на металним конструкцијама. С тога, у раду су описане карактеристике металних конструкција, објашњена је филозофија прорачуна по Еврокод стандарду и описана су оптерећења која делују на конструкције. Такође, у раду су објашњени и носачи, као елементи конструкције уз пример прорачуна и конструсања једног пуног лименог носача.

ABSTRACT

The topic of this paper is based on metal constructions. Therefore, the paper describes the characteristics of metal constructions, explains the philosophy of calculation according to the Eurocode standard and describes the loads acting on the structures. Also, the paper explains the girders, as structural elements with the example of calculation and construction of a solid sheet metal girder

Садржај

Увод.....	1
1. Лаке металне конструкције.....	2
1.1. Вруће обликовани производи.....	6
1.1.1. Штапови	6
1.1.2. Лимови	8
1.1.3. Профилисани носачи	9
1.1.4. Шупљи профили	11
1.2. Хладно обликовани производи	12
1.2.1. Хладно ваљање	13
1.2.2. Пресовање	14
1.2.3. Врсте хладно обликованих производа	15
2. Филозофија прорачуна по Еврокод стандарду	16
2.1. Сопствена тежина конструкције и стална оптерећења.....	19
2.2. Покретна и додатна оптерећења.....	20
2.2.1. Корисно оптерећење	20
2.2.2. Оптерећење снегом	21
2.2.3. Оптерећење ветром.....	24
2.2.4. Температурни утицаји.....	27
2.2.5. Сеизмичко оптерећење	30
3. Носачи.....	31
3.1. Решеткасти носачи	32
3.2. Пуни носачи	34
3.2.1. Пуни носачи израђени од ваљаних профила.....	36
3.2.2. Пуни лимени носачи	37
4. Конструисање и прорачун лимених носача	39
5. Пример.....	45
Закључак	50
Литература.....	51

Увод

Металне конструкције представљају носећу основу неког објекта састављене од металних елемената. Ове конструкције проналазе примену у готово свим подручјима грађевинарства (хале, хангари, гараже, небодери, торњеви, надстрешнице, димњаци, скеле), мостоградњи (путни, пешачки, мостови) и хидроградњи (цевоводи под притиском). Велику примену имају и код транспортних постројења (дизалице, жичаре), рударских и металуршких постројења. Погодност примене метала за носеће конструкције заснива се на њиховој великој чврстоћи, еластичности и пластичности. Међу металима, увелико се користи челик због јефтиних ваљаних производа, док се много лакше конструкције од алуминијума примењују када је мала сопствена тежина конструкције од великог значаја.

У првом поглављу рада, описане су металне конструкције, разлози због којих се данас користе и од којих материјала се израђују. Објашњено је зашто је челик најзаступљенији материјал и наведене су његове механичке карактеристике. Наведене су разлике између вруће ваљаних и хладно ваљаних производа. Приказане су и шеме на који начин се производе и једни и други производи, као и где се користе вруће, а где хладно ваљани производи.

У другом поглављу, објашњена је филозофија прорачуна по Еврокод стандарду која је прилично сложена, али се данас употребом многобројних добро развијених софтвера ипак брже долази до решења чак и код јако захтевних конструкција. Основно у тим анализама јесте одређивање реалних расподела сила у везама. Између осталог разјашњено је како на конструкцију делују сопствена тежина и нека покретна и додатна оптерећења, као што су: корисно оптерећење, оптерећење снегом, оптерећење ветром, температурни утицаји и сеизмичко оптерећење.

Треће поглавље представља увид у носаче, њихову поделу на решеткасте и пуне. Наведене су предности и једних и других, али и њихова примена код металних конструкција. Приказани су и примери из праксе, ради лакшег разумевања.

У наредном, четвртном поглављу, објашњен је прорачун као и конструисање пуних лимених носача, где је неопходно обратити посебну пажњу приликом конструисања и где имају најширу примену. Такође наведене су и контролне мере које је неопходно спровести како би конструкција била исправна.

У петом поглављу дат је приказ прорачуна једног лименог носача, а на самом крају рада изнесени су закључци из овог рада.

1. Лаке металне конструкције

Металне конструкције спадају у релативно новија решења носећих конструкција. Појава гвожђа, а потом и челика, као материјала који су се користили код конструкција датира у последњих 200 година. Челик и данас представља основни материјал код носећих грађевинских конструкција како због својих специфичних особина, тако и због функционалних и техничких предности у односу на друге грађевинске материјале, због чега је најраспрострањенији материјал код грађевинских конструкција. Користи се код готово свих грађевинских објеката попут: индустријских хала, спратних зграда, спортских и изложбених дворана, кровова стадиона, хангара, мостова, резервоара, бункера, силоса, антенских стубова, стубова далековода и код још много конструкција специјалних намена, [1].



Слика 1 – Пример једне металне конструкционе хале, [10]



Слика 2 – Пример крова ВТБ Арене, [11]



Слика 3 – Пример дизалице, [12]



Слика 4 – Пример покретне траке, [13]

Све конструкције се пројектују тако да могу поднети разне врсте оптерећења и спољашњих утицаја уз што мањи утрошак материјала, јер је веома важно обратити пажњу и на економске аспекте. Разлози због којих је челик најзаступљенији материјал код конструкционих објеката могу се уочити на основу предности које челик поседује у односу на друге конструкционе материјале [1]:

- Високе механичке особине
- Мале димензије и тежине елемената челичних конструкција
- Индустријализована производња
- Лака манипулација, транспорт и монтажа
- Велика сеизмичка отпорност
- Релативно лако фундаирање
- Могућност демонтаже и трајна вредност
- Флексибилност и адаптилност.

За неке земље Европе, укупна производња челика и процентуално учешће челичних конструкција за дати тип објекта дати су у табели 1.

Табела 1 – Преглед производње челика и процентуално учешће челичних конструкција за дати тип објекта према укупној изградњи, [1]

Земља	Производња (1000 t)	Процентуално учешће према укупној изградњи				
		Спратне зграде	Индустријске хале	Неиндустријске приземне хале	Пољопривре- дни објекти	Мостови
Немачка	1205	17	25	-	10	10
Француска	800	23	78	56	62	40
Италија	680	11	20	7	12	30
В. Британија	1182	57	95	61	85	40
Шпанија	1084	30	85	55	15	10
Холандија	482	26	80	-	-	40

Поред свих позитивних особина челик има и негативних карактеристика као што су дејство корозије и пожара. Ови проблеми захтевају посебну пажњу током изградње и експлоатације објекта. Важно је напоменути да се напушта конвенционалан тип градње и прелази се на индустријализацију која захтева сложено планирање, пројектовање, израду, монтажу, финализацију и одржавање објекта. Разлог преласка на изградњу објеката у фабрикама је све већи пораст броја људи, као и интензивне миграције.

Лаке металне конструкције представљају конструкције чије масе су знатно мање од масе уобичајених машинских конструкција. Како би се постигло смањење масе конструкције потребно је применити такве облике елемената код којих се може постићи да на појединим пресецима напони буду једнаки или приближно једнаки. Свакако, избор материјала је од круцијалне важности. Сходно томе, треба бирати материјале попут легура алуминијума, легура челика и дрвета. Одмах иза индустрије челика, друго место заузима индустрија алуминијума. Алуминујум је материјал од кога зависе многе индустрије попут авио-индустрије, ауто-индустрије, индустрије вагона... Код грађевинских конструкција алуминујум и алуминијумске легуре своју примену су пронашли у облику елемената за облагање објеката, браварије, грађевинске столарије, чак се користе и као носеће конструкције. Међутим, алуминијум као материјал за носеће конструкције се ретко користе због вишеструке цене у односу на остале типове материјала.

Неке од предности алуминијума су [2]:

- Мала специфична тежина: $\gamma = 27 \text{ N/dm}^3$ која је три пута мања од тежине челика
- Релативно висока чврстоћа
- Висока отпорност на корозију
- Одсуство склоности ка кртом лому
- Добра пластичност и обрадљивост
- Логаритамски декремент осциловања је два пута већи од челика.

Недостаци алуминијума:

- Висока цена (преко шест пута већа у односу на цену челика)
- Мали модул еластичности $E = 7000 \text{ kN/cm}^2$, док је за челик $E = 20000 \text{ kN/cm}^2$
- Могућност појаве корозије на месту додира са челиком
- Релативно велики коефицијент линеарног ширења.



Слика 5 – Пример алуминијумске конструкције, [14]

1.1. Вруће обликовани производи

Код носећих конструкција највећу примену имају вруће ваљани производи. Њих можемо сврстати у четири основне групе производа [1]:

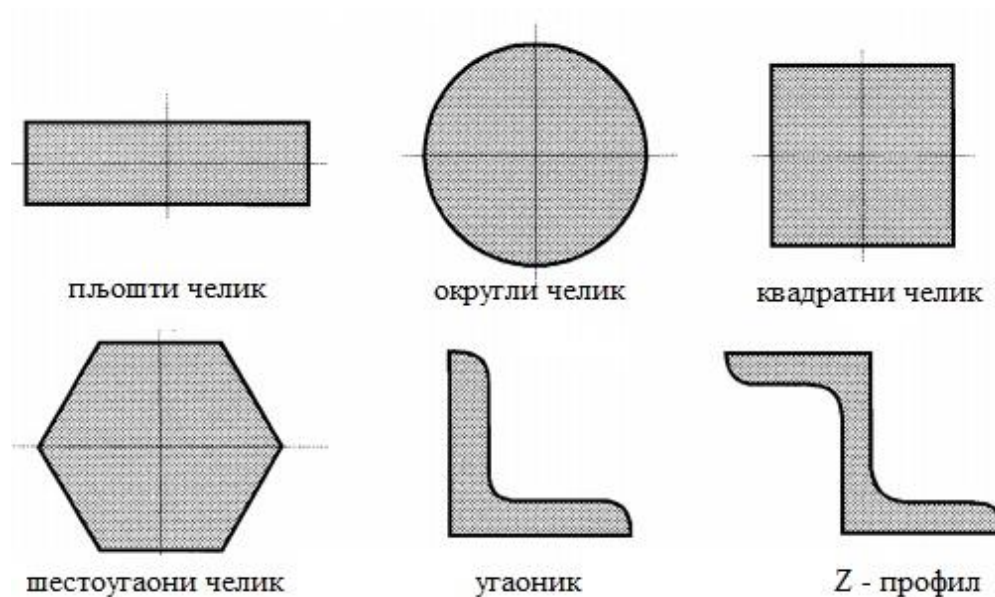
- Штапови
- Лимови
- Профилисани носачи
- Шупљи профили.

1.1.1. Штапови

Штапови се израђују у више различитих облика [3]:

- Пљоснати челик
- Универзални (широки пљоснати челик)
- Округли челик
- Квадратни челик
- Шестоугаони челик
- Угаоници
- „Те“ ($\perp$) и „Zet“ (Z) профили
- Мали I (I) и U (U) профили до 80 mm висине.

Попречни пресеци појединих штапова могу се видети на слици 4.



Слика 6 – Основни попречни пресеци штапова, [3]

У зависности од попречног пресека димензије штапова варирају. Пљошти челик се израђује ваљањем чија се дебљина креће у интервалу од 5 *mm* до 60 *mm*, ширина од 10 *mm* до 150 *mm*, а номинална дужина од 3 *m* до 15 *m*. Универзални челик се добија ваљањем помоћу два хоризонтална и два вертикална ваљка. Самим тим добија се правоугаони пресек штапа. Дебљина универзалног челика варира од 5 *mm* до 60 *mm*, ширина од 151 *mm* до 1250 *mm*, док се дужина креће од 3 *m* до 12 *m*. Када су у питању округли, квадратни и шестоугаони челик димензије се крећу у интервалима од 10 *mm* до 150 *mm*. Угаоници се израђују ваљањем између калибрисаних ваљака. Разликују се равнокраки и разнокраки угаоници, у зависности од тога да ли су краци иситх или различитих угаоника. Краци се код угаоника налазе под правим углом. Т – профили се ваљају са широком ногом или високим рабром, а Z профили се данас ретко могу наћи код носећих конструкција,[1].

Сваки профил има свој симбол и ознаку који се могу видети у табели 2.

Табела 2 – Ознаке попречних пресека штапова, [3]

POPREČNI PRESEK ŠTAPA	SIMBOL	OZNAKA
PLJOSNATI ČELIK		 80.8
UNIVERZALNI ČELIK		 350.10
OKRUGLI ČELIK		 20
KVADTRATNI ČELIK		 30
ŠESTOUGAONI ČELIK		 36

1.1.2. Лимови

Лимови се израђују ваљањем тако да се обрађују у оба правца, помоћу равних ваљака. Оваквим начином израде ивице лимова нису равне, те се касније могу обрезивати. Лимове можемо поделити према дебљини, квалитету обраде и облику.

Према дебљини лимове можемо поделити на, [3]:

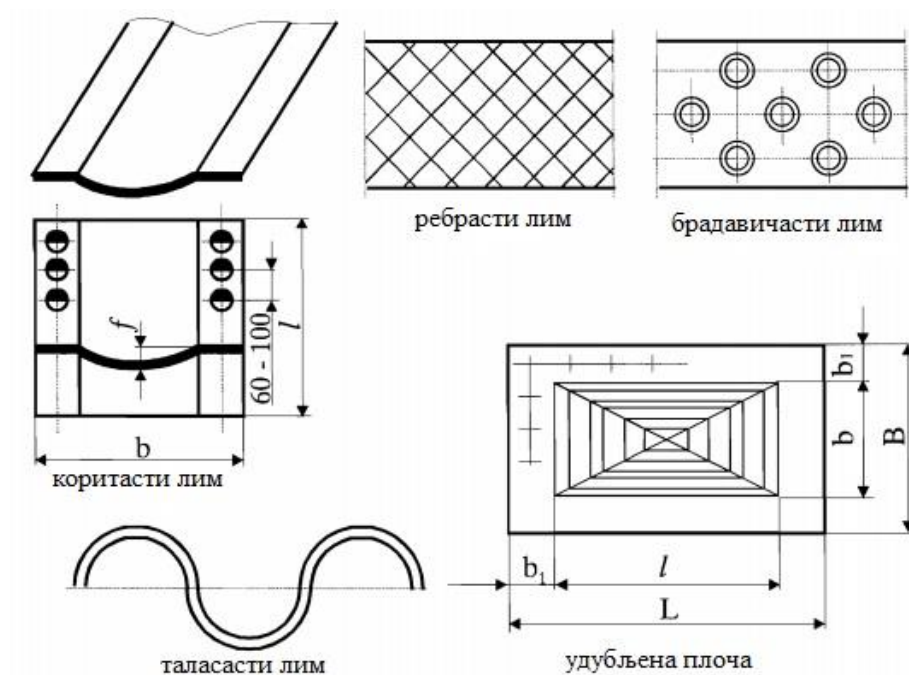
- Фине, дебљине до 3 *mm*
- Средње, дебљине до 4.75 *mm*
- Грубе, дебљине преко 4.75 *mm*

Према квалитету обраде површине могу бити, [3]:

- Глатки
- Ребрасти
- Брадавичасти
- Бушени.

Према облику могу бити, [3]:

- Равни
- Таласасти
- Коритасти (висећи)
- Удубљене плоче.



Слика 7 – Примери лимова, [3]

1.1.3. Профилисани носачи

Основни облици профилисаних носача који имају највећу примену су I и U профили. I – профили представљају основни конструкциони елемент који се користи за израду гредних и оквирних носача и стубова. Можемо их поделити на I – профиле са уским и широким ножицама.

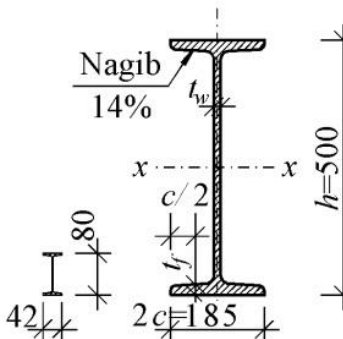
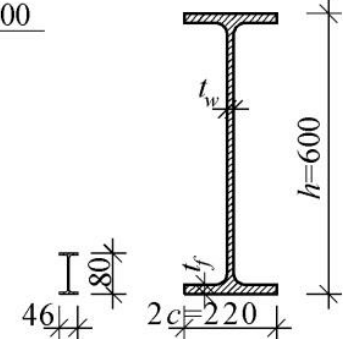
У I профиле са уским ножицама спадају I (IPN) и IPE – профили. Због технологије израде нормалних I – профила јавља се нагиб од 14%, а полупречник заобљења r једнак је дебљини ребра. Код ових профила момент инерције је релативно мали у односу на површину пресека због уске ножице.

Касније, настају профили са широким паралелним ножицама, због потребе за већом крутошћу при савијању. Ови профили познати су под називом IP – профили. Када је у питању ова категорија профила највећу примену имају европски IPE – профили. Како би се повећала економичност израде ови профили се израђују у различитим дебљинама. Разликују се [1]:

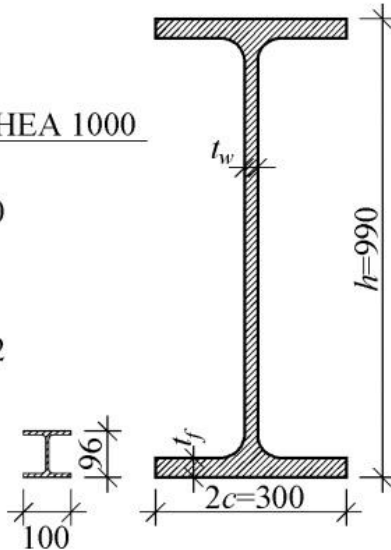
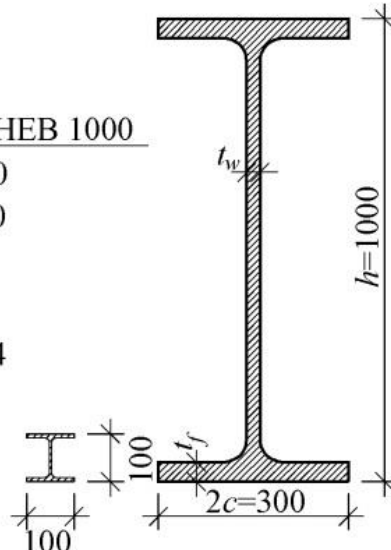
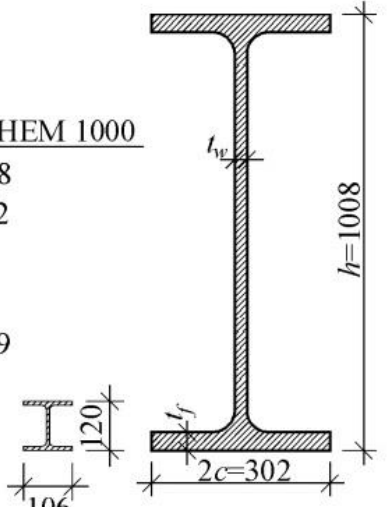
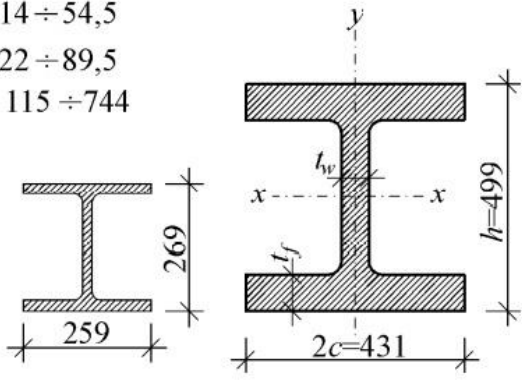
- Лака серија HEA (IPB1)
- Нормална серија HEB (IPB)
- Ојачана серија HEM (IPBv).

Последњих година појавила се и HD серија профила која је намењена специјално за стубове зграда. У табелама 3 и 4 налазе се вруће ваљани I – профили са уским, односно широким ножицама. Све серије су дате са најмањом и највећом димензијом и испоручују се у дужинама од 8 m до 15 m, [1].

Табела 3 – Вруће ваљани I – профили са уским ножицама, [1]

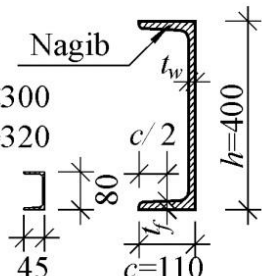
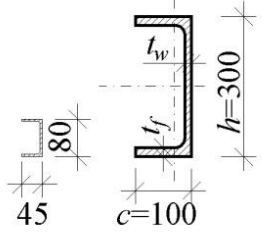
I-profil	IPE-profil
<u>I 80 ÷ I 500</u> $h : 80 \div 500$ $2c : 42 \div 185$ $t_w : 3,9 \div 18$ $t_f : 5,9 \div 27$ $m : 5,94 \div 141$ 	<u>IPE 80 ÷ IPE 600</u> $h : 80 \div 600$ $t_w : 3,8 \div 12$ $t_f : 5,2 \div 19$ $2c : 46 \div 220$ $m : 6 \div 122$ 

Табела 4 – Вруће ваљани I – профили са широким ножицама, [1]

HEA- profili	HEB-profil
<u>HEA 100 ÷ HEA 1000</u> $h : 96 \div 990$ $2c : 100 \div 300$ $t_w : 5 \div 16,5$ $t_f : 8 \div 31$ $m : 16,7 \div 272$ 	<u>HEB 100 ÷ HEB 1000</u> $h : 100 \div 1000$ $2c : 100 \div 300$ $t_w : 6 \div 19$ $t_f : 10 \div 36$ $m : 20,4 \div 314$ 
HEM-profil	HD- profil
<u>HEM 100 ÷ HEM 1000</u> $h : 120 \div 1008$ $2c : 106 \div 302$ $t_w : 12 \div 21$ $t_f : 20 \div 40$ $m : 41,8 \div 349$ 	<u>HD 260 ÷ HD 400</u> $h : 269 \div 499$ $2c : 259 \div 431$ $t_w : 14 \div 54,5$ $t_f : 22 \div 89,5$ $m : 115 \div 744$ 

Када су у питању U – профили, због идентичне технологије израде као и код вруће ваљаних I – профила, условљен је нагиб од 8% код унутрашње ножице, а полупречник заобљења r једнак је самој дебљини ножице. U – профили се израђују и са паралелним ножицама. У табели 5 се могу видети вруће ваљани U – профили, [1].

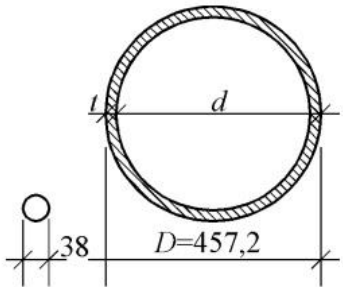
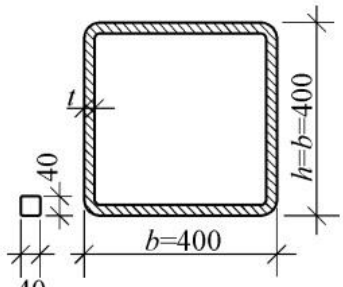
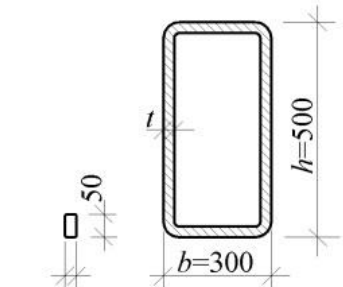
Табела 5 – Вруће ваљани U – профили, [1]

U-profil	U-profil sa paralelnim nožicama
$\square 80 \div \square 400$ $h : 80 \div 400$ $c : 45 \div 110$ $t_w : 6,0 \div 14$ $t_f : 8,0 \div 15$ $m : 8,64 \div 71,8$	$\square AP 80 \div \square AP 300$ $h : 80 \div 300$ $c : 45 \div 100$ $t_w : 5 \div 9,5$ $t_f : 8 \div 16$ $m : 8,38 \div 46$
	

1.1.4. Шупљи профили

Шупљи профили представљају елементе чији је пресек кружног, квадратног или правоугаоног прстенастог облика. Према начину израде они могу бити бешавни и шавни. Израђују се тако да се прво од рондели ваљају бешавне цеви, а потом врућим ваљањем обликују у одговарајући облик. Пресеци кружног, квадратног и правоугаоног прстенастог облика са основним димензијама налазе се у табели 6.

Табела 6 – Шупљи вруће ваљани профили, [1]

Kružni	Kvadratni	Pravougaoni
 $\varnothing 38 \cdot 2,6 \div \varnothing 609,6 \cdot 16$ $D : 38 \div 609,6$ $d : 32,8 \div 377,6$ $t : 2,6 \div 16$ $m : 2,29 \div 234$	 $\square 40 \cdot 2,0 \div \square 400 \cdot 16,0$ $h : b : 40 \div 400$ $t : 2,0 \div 16,0$ $m : 2,30 \div 190,3$	 $\square 50 \cdot 30 \cdot 2,0 \div \square 500 \cdot 300 \cdot 15$ $h : 50 \div 500$ $b : 30 \div 300$ $t : 2,0 \div 10$ $m : 2,30 \div 190,3$

1.2. Хладно обликовани производи

Под појмом хладно обликовани производи подразумева се смањење дебљине или преобликовање савијањем незагрејаног материјала. Хладно обликоване профиле представљају конструктивни елементи који су добијени хладним обликовањем челичних лимова и трака. Технологије које се користе за израду ових профила су ваљање и пресовање. Овакви начини израде спадају модерније, јер први производи добијени на овакав начин датирају из 1850. године. Међутим, своју ширу примену проналазе тек након Другог светског рата, када и настају први прописи из ове области 1946. године. Разлози због којих се даље развијала ова технологија израде су многобројни, [6]:

- Мала тежина, због чега се смањује и утрошак челичног материјала по m^2 објекта у поређењу са вруће ваљаним профилима (15 – 40%, док је за неке елементе преко 50%)
- Широки дијапазон облика и димензија производа
- Већа прецизност димензија (мање производне толеранције)
- Квалитет површина хладно обликованих производа је бољи од вруће ваљаних профила
- Механичке карактеристике основног материјала се повећавају хладним обликовањем
- Лако се производе „гнездасти“ пресеци погодни за компактно паковање, манипулацију и транспорт
- Адекватним избором облика пресека могу се постићи значајни естетски и конструктивни ефекти.

Поред свих ових предности јављају се и одређени недостаци[6]:

- Виша јединична цена у односу на вруће ваљане профиле
- Мања отпорност у односу на губе поступке при транспорту и монтажи
- Израженија опасност од дејства корозије, у смислу да исти корозиони ефекат више слаби танкозидни пресек хладно обликованог профила у односу на дебелозидни пресек вруће ваљаних профила
- Релативно теже спајање.

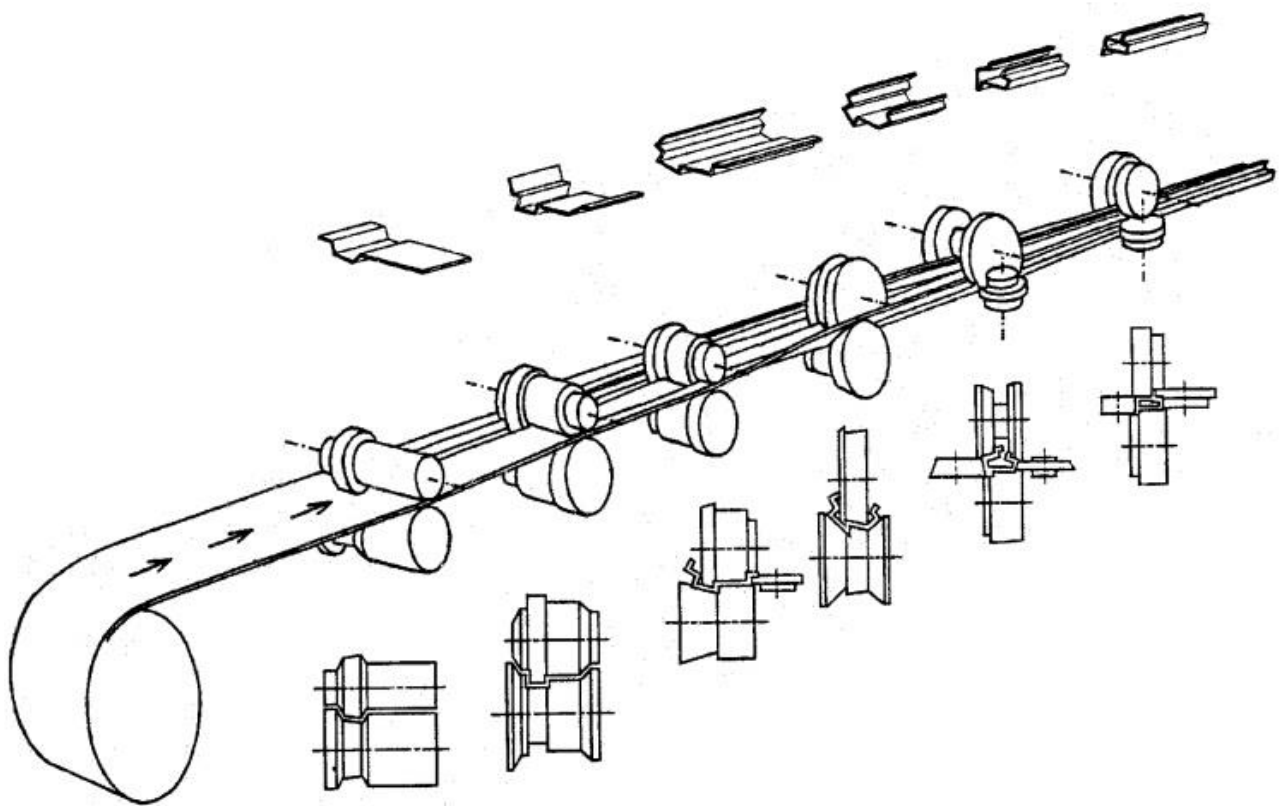
Хладно обликовани профиле и лимови се производе од равних трака постепеним савијањем у хладном стању и дебљина зидова свих делова попречног пресека је константа. Материјали који се најчешће користе за израду хладно обликованих профила су нискоугљенични и легирани челици са границом развлачења до $250 N/mm^2$ до $630 N/mm^2$. Веома је важно да материјал има способност да се пластично деформише, због многих попречних савијања са малим полупречницима без појаве прелина. Због својих механичких карактеристика челици највише одговарају овим условима, [6].

1.2.1. Хладно ваљање

Ваљање је један од поступака обликовања метала деформисањем, код кога се у одливном блоку метал пропушта између ваљака који се окрећу, те смањују пресек и задају жељени облик уз побољшање механичких особина. Разликујемо две врсте ваљања, [6]:

- Ваљање у топлом стању
- Ваљање у хладном стању.

Када је у питању хладно ваљање, оно се изводи у фабрикама које поседују аутоматизоване машине које су компјутерски вођене. Код једноставних пресека број ваљака се креће од 6, а за сложене до 15. Брзина којом се ваљци крећу налази се у интервалу од 6 до 92 m/min . Након завршеног ваљања добијени производ се аутоматски одсеца на компјутерски одређену дужину која је углавном од 6 m до 12 m . Овакав поступак израде веома је погодан за масовну производњу хладно обликованих профила и лимова, односно за производњу у великим серијама. Једна такав поступак хладног ваљања може се видети на слици 6, [5].

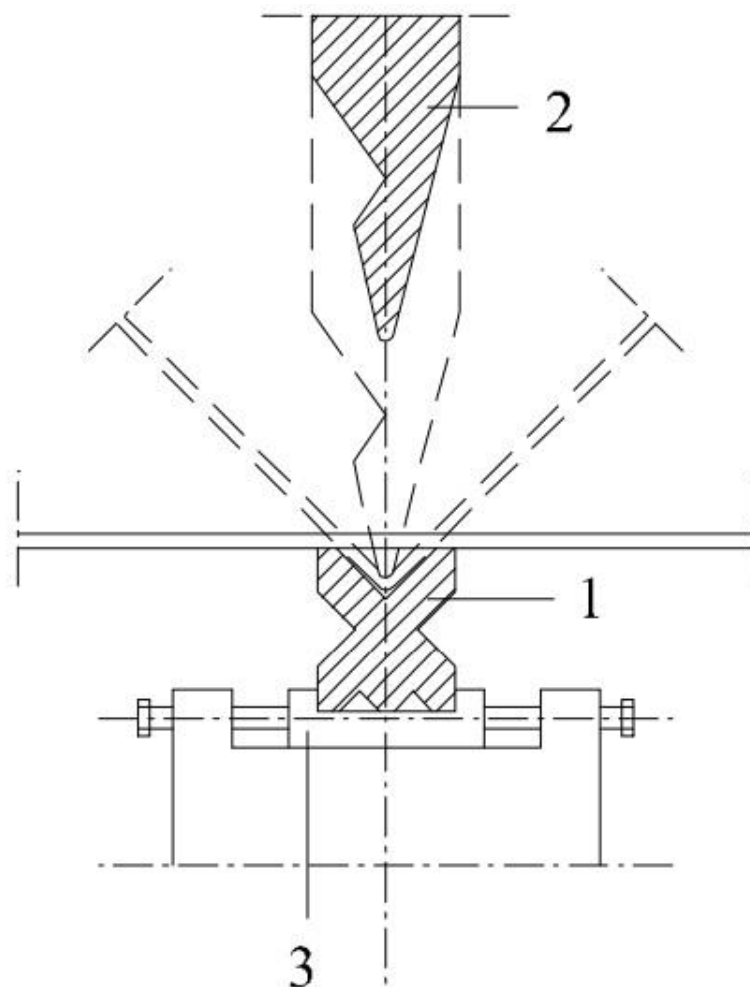


Слика 8 – Шема хладног ваљања, [6]

1.2.2. Пресовање

Један од начина на који се могу производити хладно обликовани је и пресовање. Машине на којима се изводи пресовање називају се пресе и оне могу бити механичке или хидрауличке. Пресовање се врши малим брзинама деформисања, због чега је овај поступак погодан за мање серије, мање дужине, једноставније облике и веће ширине профила. На пресама се могу производити и профили променљиве геометрије. Преса се састоји из неколико основних делова, [6]:

1. Доњи део пресе – жлеб
2. Горњи део пресе – чекић
3. Матрица за подешавање.

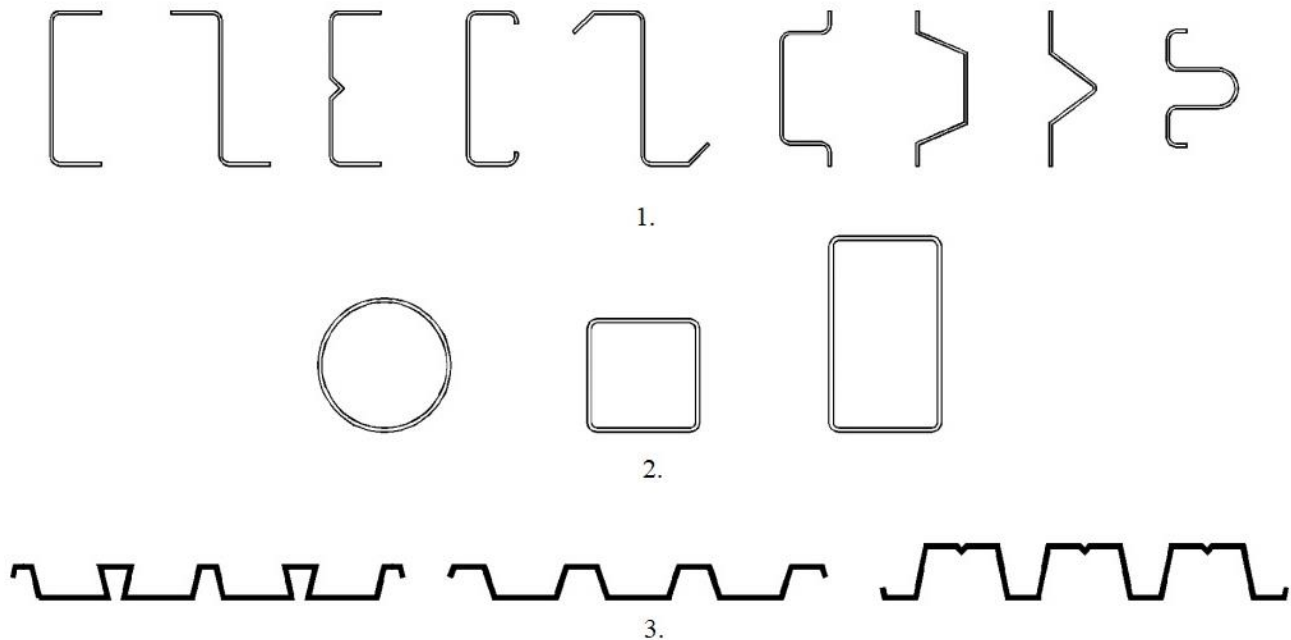


Слика 9 – Приказ основних делова пресе, [6]

1.2.3. Врсте хладно обликованих производа

Хладно обликовани производи имају веома широку област примене, због чега се производе у различитим облицима. Могу се наћи у зградарству (рожњаче, фасадне ригле, подни носачи, решеткасти носачи, типски главни носачи, стакленици, високорегална складишта, фасадне и кровне облоге...), мостоградњи (олучаста и трапезаста укрућења ортотропних плоча, ивични носачи, одбојници, граничници...), хидротехничким конструкцијама (укрућења табластих устава, талпе...), специјалним конструкцијама (торњеви, јарболи...). Према врсти хладно обликованих производа деле се на, [5]:

1. Хладно обликоване профиле отвореног пресека
2. Хладно обликоване профиле затвореног пресека
3. Хладно обликоване профилисане лимове.

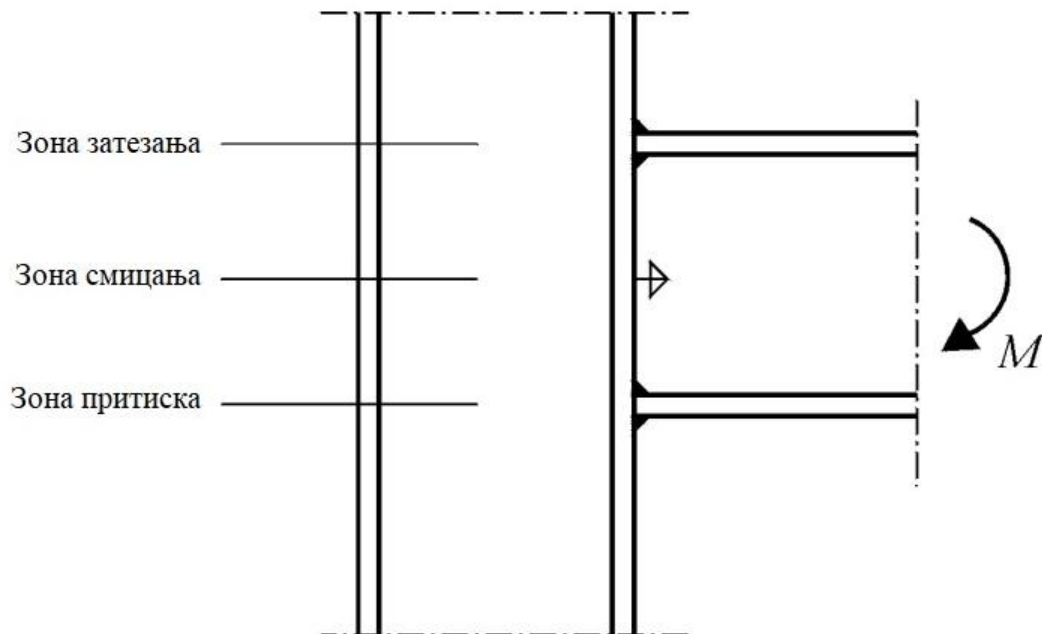


Слика 10 – Врсте хладно обликованих профила, [5]

2. Филозофија прорачуна по Еврокод стандарду

Када је у питању филозофија прорачуна може се рећи да је моделирање понашања веза и монтажних наставка, са практичног аспекта гледано, веома обиман, дуготрајан и сложен посао. Данас, тај посао је олакшан захваљујући програмима који се користе. На пример: Еврокод 3 дефинише сложене прорачунске моделе на основу којих се аналитичким путем могу одредити основне карактеристике веза. Реч је о сложенем поступку помоћу кога се обухвата допринос сваке компоненте везе моментној отпорности и крутости везе. Тако се код заварене везе греда – стуб посматрају три карактеристичне зоне напрезања, [1]:

- Зона затезања
- Зона притиска
- Зона смицања.



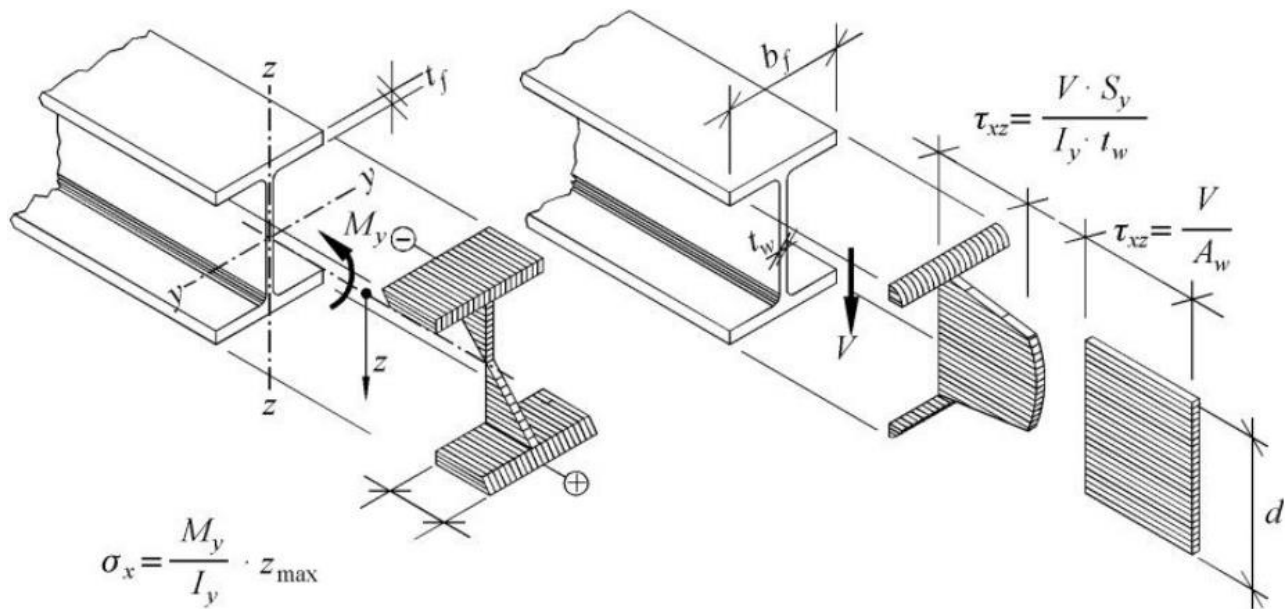
Слика 11 – Карактеристичне зоне круте везе остварене заваривањем, [1]

Рачунска моментна отпорност одређује се тако што се узимају у обзир следећа напрезања елемената везе, [1]:

1. У зони затезања:
 - Пластификација ребра стуба
 - Пластификација ребра греде
 - Пластификација ножице стуба
 - Лом по завареном шаву

2. У зони притиска:
 - Гњечење ребра стуба
 - Избочавање ребра стуба
3. У зони смицања:
 - Лом смицањем панела ребра стуба

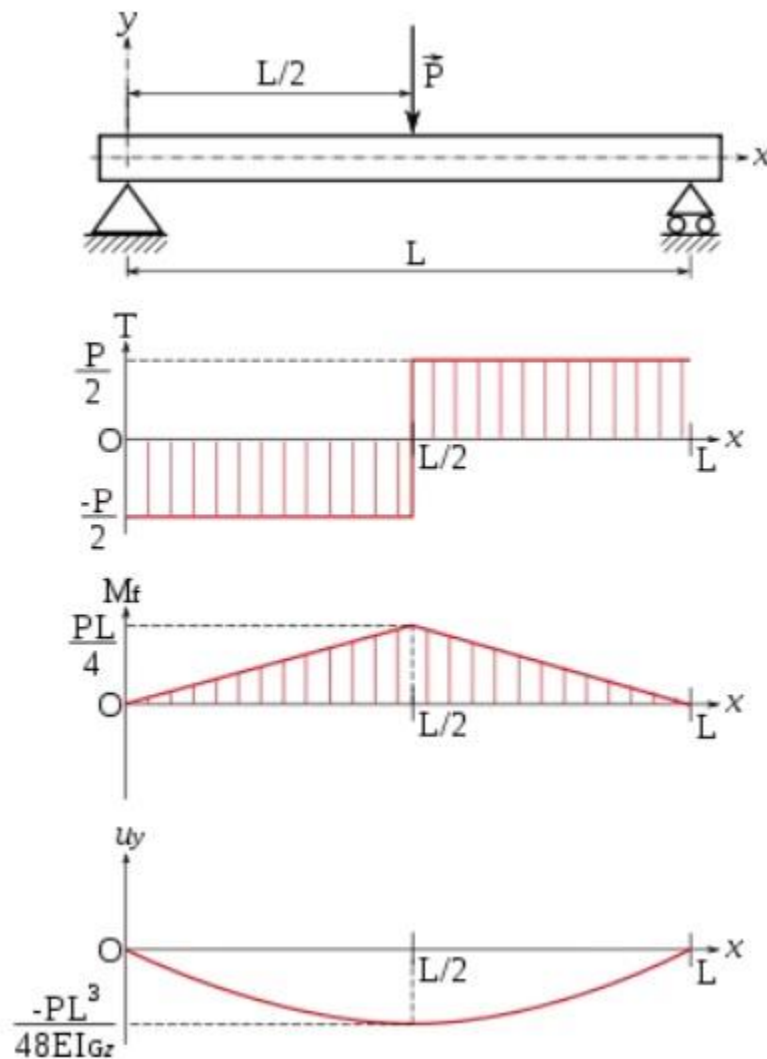
Основно у анализи веза јесте одређивање реалне расподеле сила у њој, односно замена стварних утицаја изазваних спољним оптерећењем. На пример: код I носача који је напрегнут моментом савијања и трансверзалном силом може се претпоставити да већи део момента савијања преузимају ножице, а ребро прихвата укупну трансверзалну силу. На основу тога, може се закључити да ће се на исти начин понашати и монтажни наставци ребра и ножица.



Слика 12 – Дијаграми напона код I носача, [1]

Анализе и прорачуни који се спроводе код металних конструкција врше се првенствено због оптерећења која делују на њих. Сва та оптерећења која имају дејство на конструкцију можемо класификовати према разним факторима, [1]:

- Пореклу
- Непосредности деловања
- Промени у времену и простору
- Карактеру деловања.



Слика 13 – Статички дијаграм оптерећења једног пуног носача, [5]

2.1. Сопствена тежина конструкције и стална оптерећења

Правилним избором материјала за израду конструкције и логичним искоришћењем попречних пресека добија се одговарајућа вредност сталног оптерећења, односно сопствене тежине елемената конструкције. Сопствена тежина конструкције заправо представља стално оптерећење које је статичке природе. Тежина одређеног елемента израчунава се тако што се помноже запремина елемента конструкције, запреминска маса и гравитационо убрзање.



Слика 14 – Пример једне носеће конструкције, [15]

Ако се узме у обзир да се на почетку прорачуна не располаже са тачним вредностима сопствених тежина елемената, те вредности се усвајају на основу претходних искустава или на основу неких сличних, већ готових конструкција. Вредности које су усвојене не смеју одступати више од 3% након димензионисања. У случају да дође до веће разлике, неопходне су корекције.

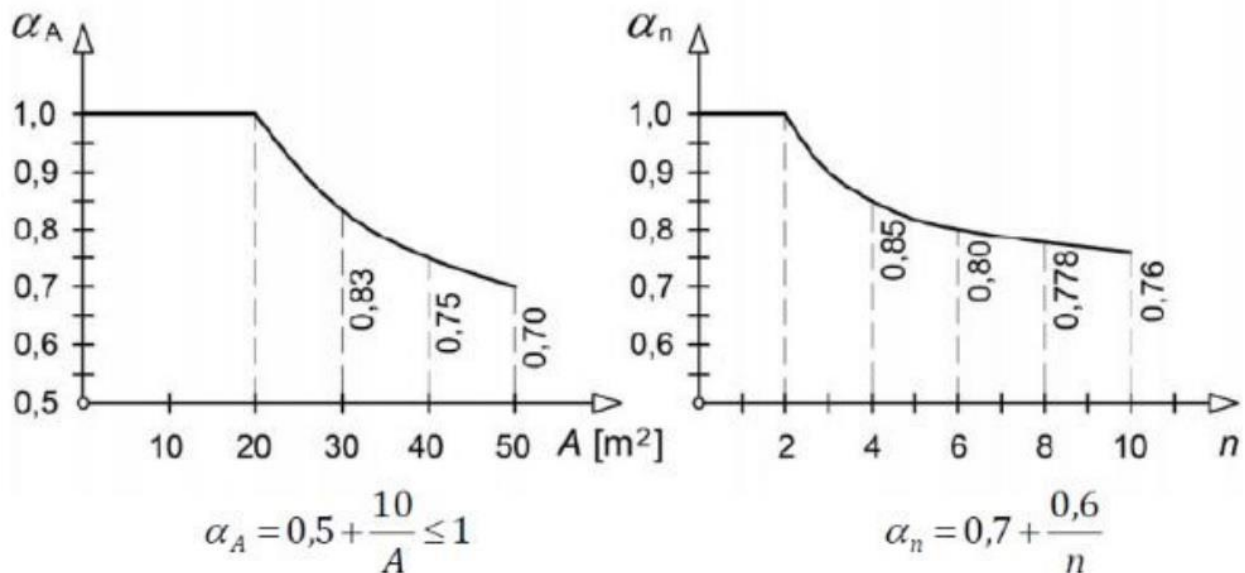
2.2. Покретна и додатна оптерећења

Поред сопствене тежине и сталних оптерећења на конструкцију могу деловати разна покретна и додатна оптерећења. Овакав тип оптерећења настаје под утицајем различитих спољних утицаја, те се разликују, [5]:

- Корисно оптерећење
- Оптерећење снегом
- Оптерећење ветром
- Температурни утицаји
- Сеизмичко оптерећење.

2.2.1. Корисно оптерећење

Под корисним оптерећењем сматрају се променљива оптерећења настала утицајем људи и инвентара унутар објекта. У овакав тип оптерећења спадају површинска, линијска и концентрисана оптерећења. Обзиром да је током експлоатационог века објекта могуће мењати његов садржај, као и да је вероватноћа истовременог искоришћења оптерећености сваког квадратног метра објекта на свим деловима изузетно мала, нека оптерећења је могуће редукovati у складу са факторима редукције покретних оптерећења.

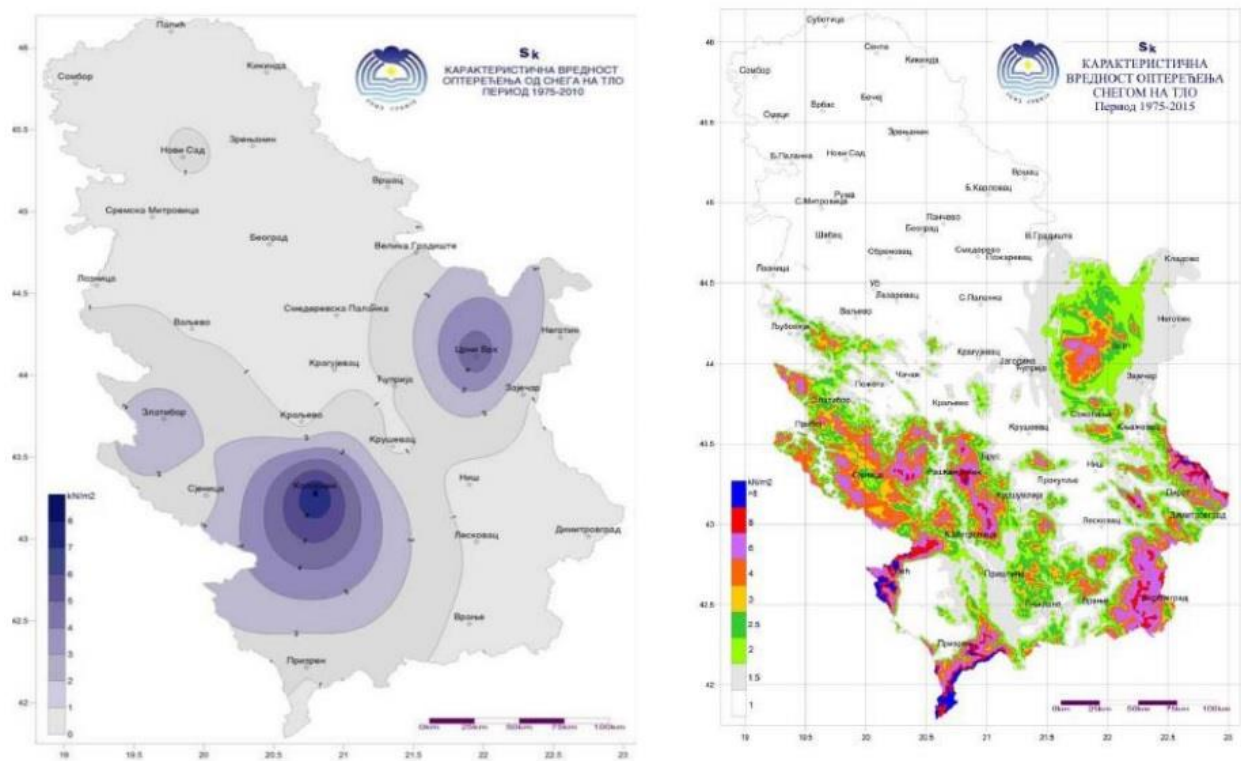


Коефицијент редукције корисног оптерећења (за $\psi_0 = 0,7$)

Слика 15 – Редукција корисног оптерећења код елемената, међуспратних конструкција и вишеспратних зграда, [5]

2.2.2. Оптерећење снегом

За оптерећење снегом можемо рећи да је оно променљиво, непокретно и статичко. Међутим, у зависности од географске локације изузетна оптерећења снегом могу бити третирана као инцидентна. Запреминска тежина снега зависи од трајања снежног покривача, локације, климе и надморске висине. На пример: средња запреминска тежина свежег снега износи око 1.0 kN/m^3 , слегнутог до неколика дана после падања 2.0 kN/m^3 , старог до неколико месеци после падања $2.5 - 3.5 \text{ kN/m}^3$, а влажног kN/m^3 , [5]. Оптерећења снегом можемо поделити на оптерећења снегом на тлу и оптерећења снегом на кровове. Карактеристична вредност оптерећења снегом на тлу је оптерећење базирано на годишњој вероватноћи прекорачења од 2%, што можемо видети на примеру Републике Србије.



Слика 16 – Карта снега Републике Србије без утицаја надморске висине, [5]

Када је реч о оптерећењу снега на крововима, важно је напоменути да су конструкције од челика изузетно осетљиве због мале сопствене тежине. Овакав тип оптерећења третира се као вертикални и интензитет оптерећења у зависности од нагиба кровне равни, одређује се на основу следеће табеле:

Табела 7 – Оптерећење снегом, [7]

Нагиб крова (°)	≤ 20	25	30	35	40	45	50	55	60	≥ 60
$s \text{ (kN/m}^2\text{)}$	0,75	0,70	0,65	0,60	0,55	0,50	0,45	0,40	0,35	0,00

Карактеристична вредност оптерећења од снега на крову је производ карактеристичне вредности оптерећења снегом на тлу и одговарајућих коефицијената, [7]:

- Коефицијента облика оптерећења од снега на крову, који представља однос оптерећења од снега на крову и тлу (без сметова), без утицаја изложености и термичких ефеката
- Коефицијента изложености, којим се дефинише смањење или повећање оптерећења од снега на крову незагреване зграде
- Термичког коефицијента, којим се дефинише смањење оптерећења од снега на крову у функцији топлотног флукса кроз кров који изазива топљење снега
- Коефицијента за изузетна оптерећења од снега, за који је препоручена вредност 2.0

На оптерећење крова снегом утичу и следећи фактори,[7]:

- Облик крова
- Његова термичка својства
- Храпавост његове површине
- Количина топлоте испод крова
- Близина суседних зграда
- Околни терен
- Локални метеоролошки климатски услови

У одређеним случајевима долази до појаве веће количине снежног покривача или претварања у лед, што доводи до непредвиђених последица по конструкцију, а у појединим случајевима и до лома. Баш из тог разлога неопходно је повећати одређене вредности из стандарда, како би се избегао овакав сценарио. Када постоји могућност од прекомерног нагомилавања снежног покривача, такво дејство снега се третира као инцидентно.



Слика 17 – Пример лома конструкције услед дејства снега, [16]

2.2.3. Оптерећење ветром

Под појмом ветар сматра се струјање ваздуха изнад површине Земље, односно струјање гасова у великом обиму. На површини планете Земље, ветар се састоји из великих покрета ваздушних маса. Ветар настаје због разлика у атмосферским притисцима. Када постоје такве разлике, ваздух почиње да се креће из подручја са вишим према подручју са нижим притиском, због чега и настају ветрови различитих брзина. Гледано са становишта механике флуида, ветар представља турбулентно кретање ваздушног флуида. Оптерећење ветром је директно, променљиво оптерећење динамичког карактера и јавља се у виду:

- Притиска
- Сишућег дејства
- Вртложног дејства.



Слика 18 – *Пример лома конструкције моста услед дејства ветра, [17]*

Конструкције оптерећене ветром јесу последица дејства аеродинамичког притиска ветра, коефицијента силе или притиска и изложене површине конструкције. Ветар се у оквиру наших стандарда може дефинисати на више начина, [5]:

- У метеоролошком смислу као хоризонтално или приближно хоризонтално струјање ваздуха
- У смислу механике флуида као турбулентно кретање ваздуха
- У математичком смислу као случајан, стационаран и ергодичан процес
- У смислу оптерећења као динамичко оптерећење случајног карактера, које се, у прорачуну по овом стандарду, третира као квазистатичко и делује у хоризонталним равнима.

Аеродинамички притисак ветра представља квазистатички притисак ветра по јединици површине оптерећене конструкције. Израз за прорачун:

$$(1) \quad q = \frac{1}{2} \rho v^2 \cdot 10^3 (kN/m^2)$$

ρ – густина ваздуха у kg/m^3

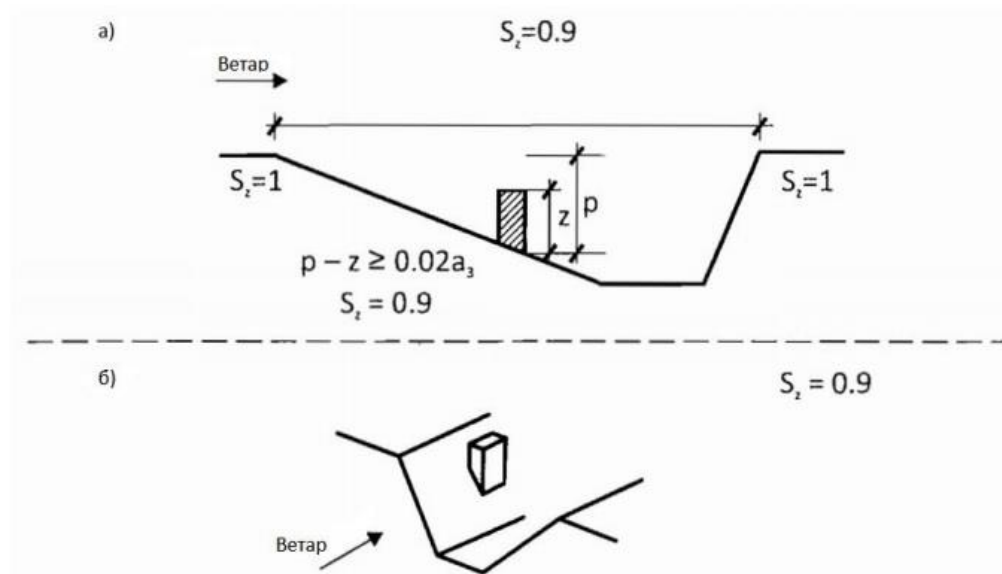
v – брзина ветра у m/s

Осредњи аеродинамички притисак ветра $q_{m,T,z}$, за одговарајућу брзину ветра $v_{m,T,z}$, одређен је једначином:

$$(2) \quad q_{m,T,z} = q_{m,T,z} S_z^2 K_z^2 (kN/m^2)$$

S_z – фактор топографије

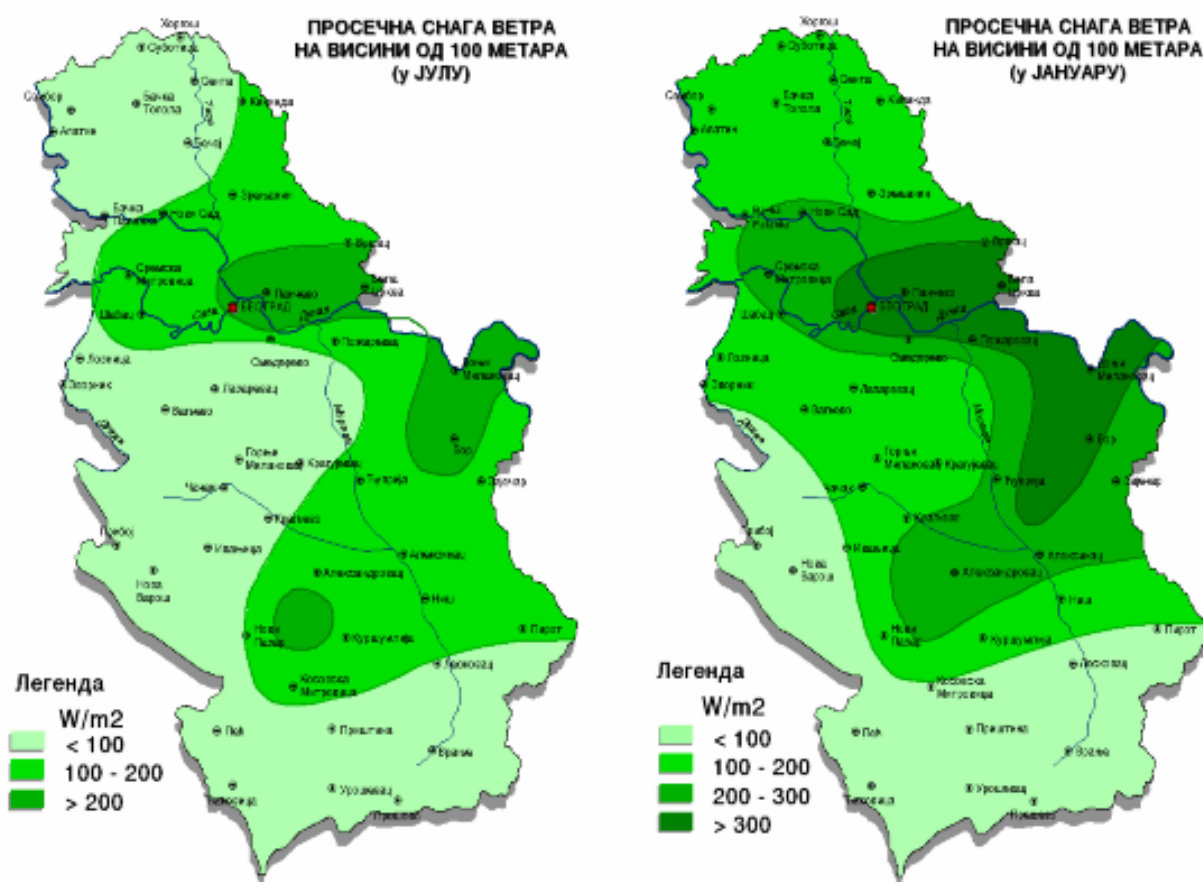
K_z – фактор експозиције терена



Слика 19 – Фактор експозиције терена при деловању ветра а) управно на осу околине; б) паралелно оси околине, [5]

На оптерећење ветром додатно утиче храпавост терена, што се изражава преко фактора експозиције. Усвојене су три класе храпавости терена,[5]:

- Класа храпавости А: велике водене површине (мора и језера), мирне и узбуркане
- Класа храпавости В: отворени, равни терени са ретким појединачним препрекама, дрвећем, кућама...
- Класа храпавости С: шумовити предели, индустријске зоне, урбани комплекси, градови.



Слика 20 – Просечна снага ветра Републике Србије у Јануару и Јулу, [18]

2.2.4. Температурни утицаји

Температурни утицаји на конструкцију или елемент конструкције, јесу утицаји који настају услед температурног поља у одређеном временском интервалу. Овакав тип утицаја се сврстава у променљива и индиректна дејства. Како би температурни утицаји били разумљивији потребно је објаснити основне термичке појмове, а то су[8]:

- Температура ваздуха у хладу
- Максимална температура ваздуха у хладу
- Минимална температура ваздуха у хладу
- Почетна температура
- Равномерна компонента температуре
- Температурна разлика

Температура ваздуха у хладу представља температуру измерену термометрима постављеним у бело обојену дрвену кутију, са отвореним низом паралелно постављених трака које пропуштају ваздух и штите од кише, познати су под називом „Стевенсонов екран“.

Вредност максималне температуре ваздуха у хладу са годишњом вероватноћом прекорачења од 0.02 (што је еквивалентно средњем повратном периоду од 50 година), која је заснована на максималним регистрованим вредностима мереним сваког сата.

Вредност максималне температуре ваздуха у хладу са годишњом вероватноћом прекорачења од 0.02 (што је еквивалентно средњем повратном периоду од 50 година), која је заснована на минималним регистрованим вредностима мереним сваког сата.

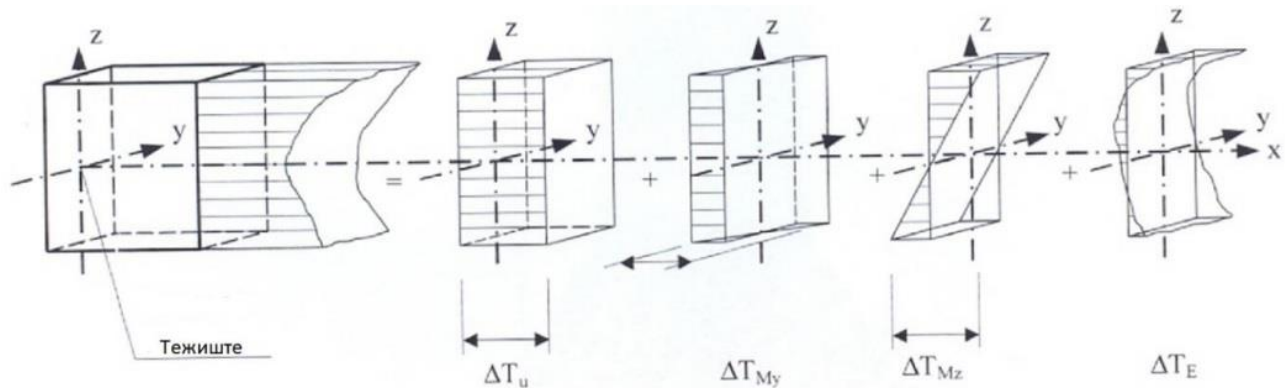
Почетна температура јесте температура елемента конструкције која одговара релевантном стању његовог уграђивања у конструкцију, након кога је спречено његово слободно померање.

Равномерна компонента температуре представља температуру, константну за цео попречни пресек, која одређује издужење или скраћење елемената или конструкције.

Температурна разлика јесте део профила (распореда) температуре у елементу конструкције који представља температурну разлику између спољашње контуре елемента и неке унутрашње тачке елемента, [8].

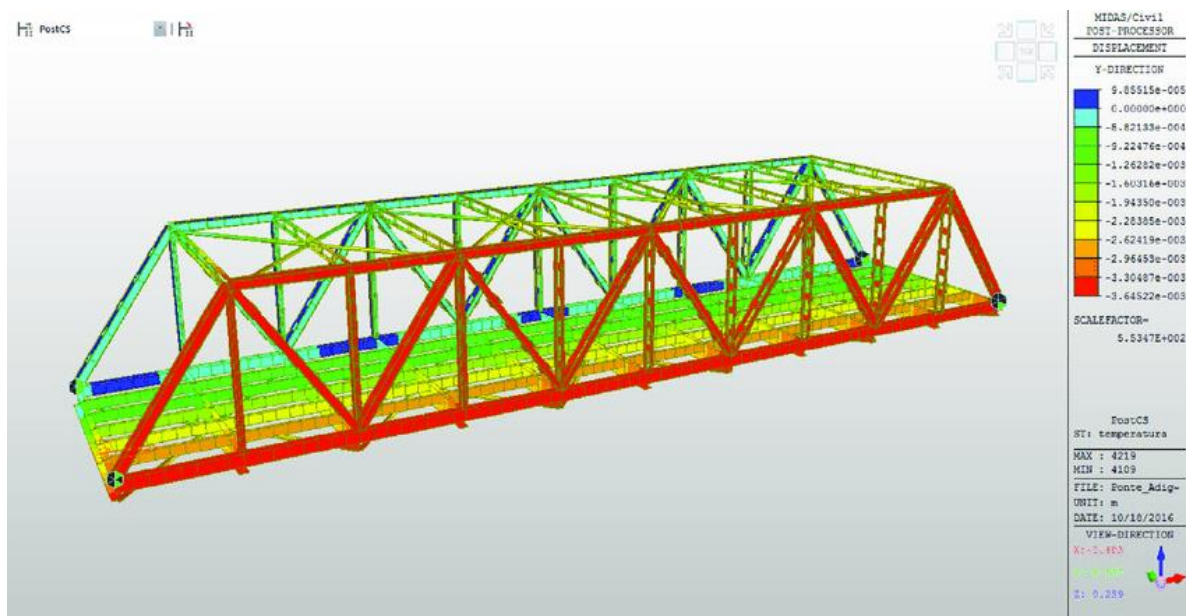
Расподела температуре одређеног конструкцијског, дела на четири саставне компоненте,[8]:

- Компонента линеарно променљиве температуре: $\Delta T_u = T - T_0$
- Компонента линеарно променљиве температурне разлике ΔT_{My} , око осе z-z
- Компонента линеарно променљиве температурне разлике ΔT_{Mz} , око осе y-y
- Компонента нелинеарне температурне разлике ΔT_e , ово резултира у равнотежи напона, који не производе оптерећење елемената.



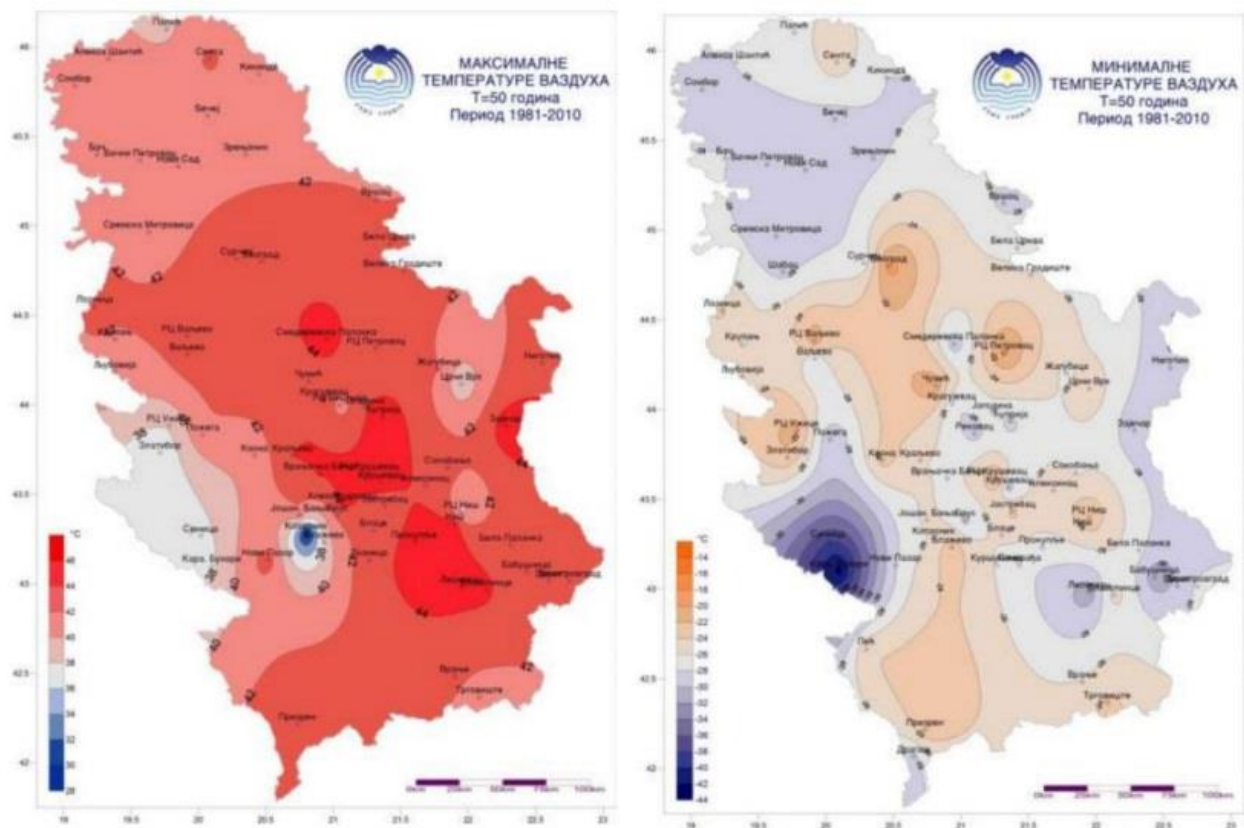
Слика 21 – Компоненте температурног профила у конструктивном елементу, [8]

Данас се, помоћу одређених програма могу предвидети и детаљно анализирати термички утицаји на конструкција које се требају извести. Једна од таквих анализа може се видети на слици 24.



Слика 22 – Термална анализа једне лаке конструкције, [19]

Када је у питању Република Србија, карта максималне и минималне температуре може се видети на слици 23.



Слика 23 – Карта Републике Србије са минималном и максималном температуром, [5]

2.2.5. Сеизмичко оптерећење

Под појмом сеизмичко оптерећење подразумева се примена побуђења изазваног земљотресом на конструкцији. Земљотрес представља осциловање делова тла које је изазвано природним или вештачким узроцима (експлозијама). Сеизмичко оптерећење преставаља инцидентно, директно дејство, динамичке природе. До сеизмичког оптерећења долази додиром површине конструкције са тлом, суседним конструкцијама или гравитационим таласима од цунамија.



Слика 24 – *Пример рушења зграде усле земљотреса, [20]*

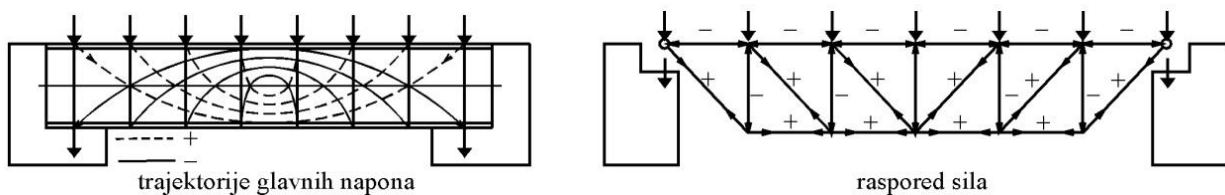
Подрхтавање и цепање тла може бити веома погубно за конструкције и грађевинске објекте уколико је довољно великог интензитета. Поред тога, може довести и до ликвифације тла. Ликвифација тла је појава промене механичких особина тла услед његовог натапања, због чега оно губи своју чврстоћу и понаша се као течност.

Данас је у свим развијеним земљама усвојен стандард помоћу кога се врши оцењивање вероватноће потенцијал сеизмичке опасности. На основу овог стандарда, на подручјима која су сеизмички опасна изводе се конструкције које могу поднети велика сеизмичка оптерећења.

3. Носачи

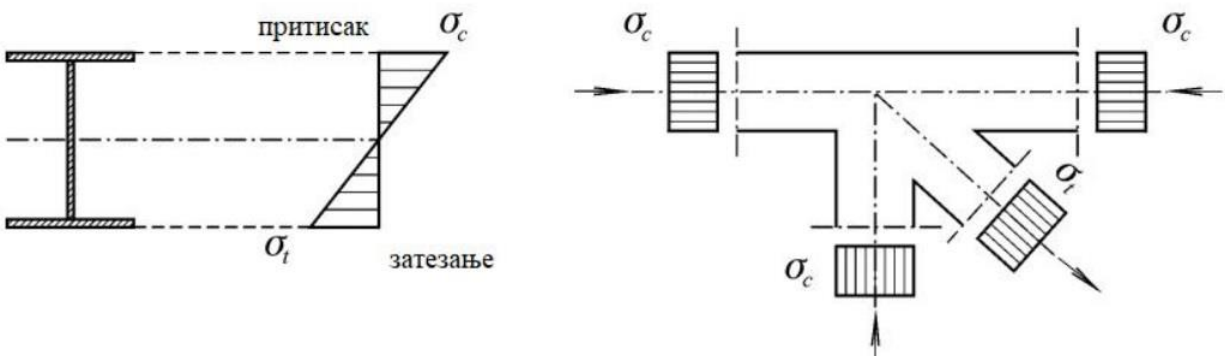
Носачи представљају елементе конструкције које су оптерећене на савијање, а савијање носача може бити последица следећих случајева напрезања: чистог правог савијања, савијања силама, косог савијања, косог савијања силама и ексцентричног притиска или затезања. Када је реч о ексцентричном притиску или затезању, важно је напоменути да се код носача јављају напрезања у области великих ексцентритета, односно то су напрезања код којих су утицаји савијања већи од утицаја аксијалних сила. Елементи код којих је доминантна аксијална сила, не спадају у носаче. Према конструктивном извођењу носачи се могу поделити на, [1]:

- Решеткасте носаче
- Пуне носаче.



Слика 25 – Напрезање пуних и решеткастих носача

Оно што чини разлику између пуних и решеткастих носача је начин израде. Код пуних носача појасеви су спојени пуним зидом – ребром, док је код решеткастих носача повезивање горњег и доњег појаса остварено штаповима испуне – вертикалама и дијагоналама. Поред разлика у начину израде, решеткасти и пуни носачи се разликују и по начину напрезања, иако имају исту улогу и супротстављају се сличном оптерећењу. Пријем момента савијања остварује се на сличан начин, док се битне разлике јављају код трансверзалних (смичућих) сила. Пуни носачи трансверзалну силу прихватају ребром, док решеткасти носачи пријем смичућих сила остварују аксијалним напрезањем штапова испуне.



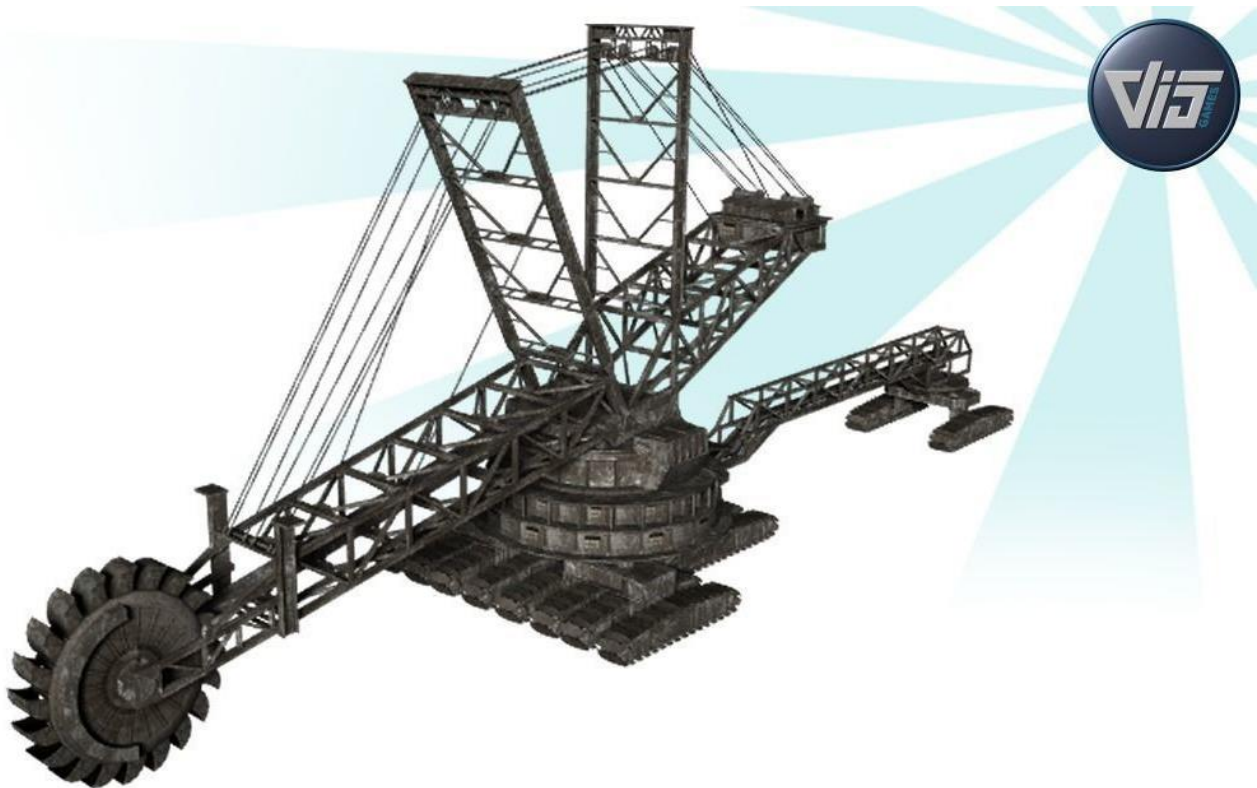
Слика 26 – Дијаграм нормалних напона код пуних и решеткастих носача, [1]

3.1. Решеткасти носачи

Решеткасти носачи проналазе улогу у случајевима када конструкција треба да пренесе оптерећење преко великог распона или дохвата и када је примена пуних лимених носача нерационална из следећих разлога, [2]:

- Велики распон захтева и релативно велику висину носача, а што погоршава степен искоришћења материјала
- Усложњавају се услови постизања стабилности лимова на избочавање
- Ако су оптерећења релативно мала, обезбеђење потребне крутости носача (која је нормирана), погоршава рационалност искоришћења материјала.

Решеткасти носачи су идеални искључиво код великих распона који су оптерећени претежно статичким оптерећењем. Међутим, технологија израде је доста сложенија од технологије израде пуних носача, због чега може доћи до појаве грешака које поспешују замор који може довести до хаварије конструкције. Своју примену пронашли су код машина за механизацију, а то су: грађевинске стубне дизалице, велики роторни багери, претоварни мостови великих распона, стреле багера са повлачком кашиком...



Слика 27 – Пример примене решеткастих носача код машина за механизацију, [21]

Према облику испуне (дијагоналне и вертикалне) разликују се следећи карактеристични типови решетке, [2]:

1. Троугласто – дијагонална решетка са једностраним вертикалама
2. Троугласто – дијагонална решетка са обостраним вертикалама
3. Троугласто – дијагонална решетка без вертикала
4. Троугласто – дијагонална решетка са једнострано нагнутим дијагоналама
5. Полудијагонална решетка
6. Ромбидална решетка
7. Троугласто – дијагонална решетка са допунском испуном.

Исто тако, према облику контуре појасева, разликују се, [2]:

- Са паралелним појасевима
- Полигоналне
- Троугласте
- Трапезне

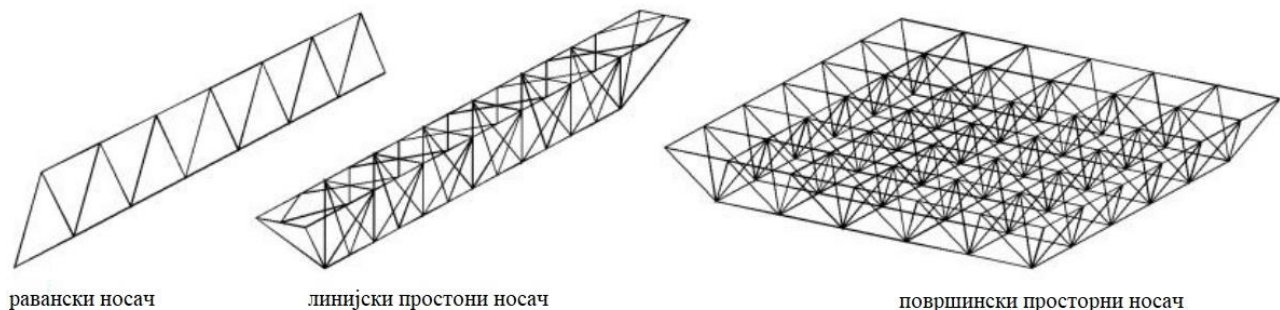
Код решетке са паралелним појасевима, постиже се максимална унификација елемената.

Полигонална контура решетке сразмерно прати дијаграм промене нападног момента савијања, остварујући константност оптерећења појасева и рационалност у погледу тежине.

Троугласта контура решетке се користи за стреле и конзоле.

Трапезни облик решетке је средње решење између полигоналних и са паралелним појасевима, јер има тенденцију ка унификацији елемената и рационалности сопствене тежине због повољног облика контуре.

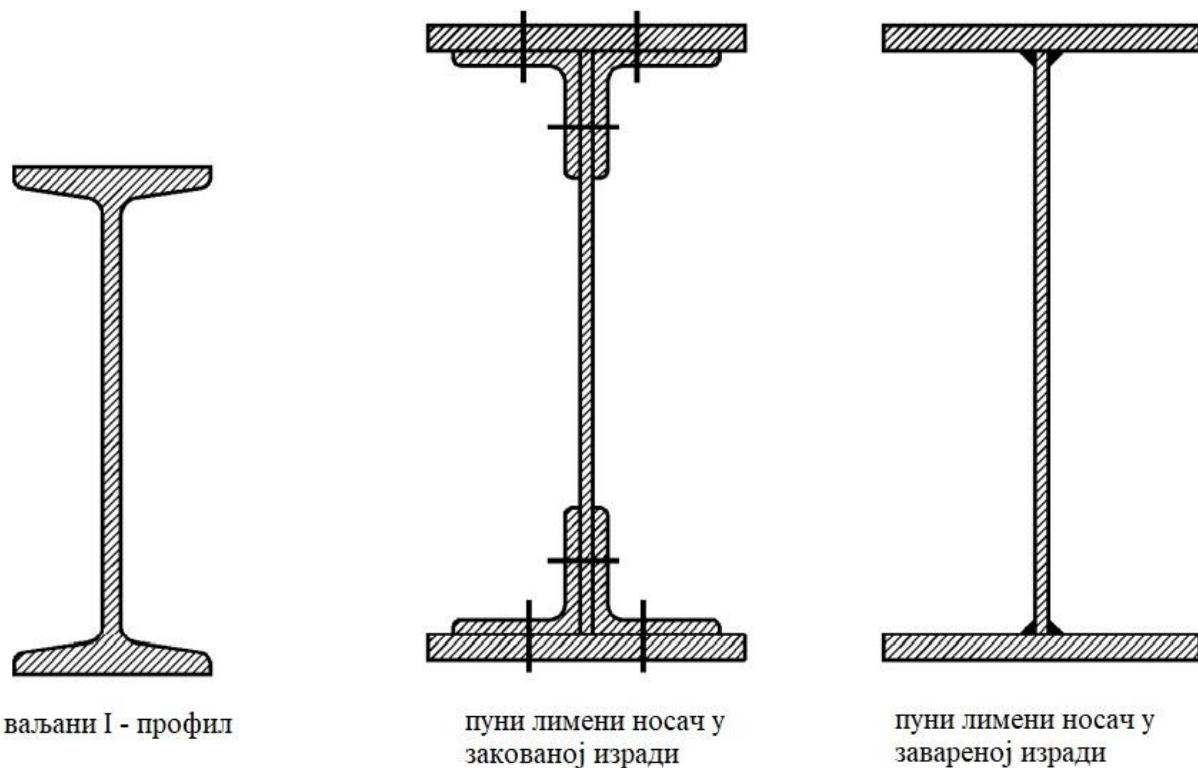
Према просторном положају носаче можемо поделити на раванске и просторне (линијски и површински).



Слика 28 – Просторни положај решеткастих носача, [1]

3.2. Пуни носачи

Када су у питању пуни носачи углавном се користе стандардни ваљани профили и профили који су образовани спајањем равних челичних лимова помоћу прикључних угаоника и закивака или директним заваривањем. У зависности од тога на који начин се спајају лимови и како се остварује њихов заједнички рад, пуни лимени носачи се деле на заковане носаче и носаче у завареној изради. Оба типа имају заједнички назив, а то је пуни лимени носач. Данас се спајање челичних елемената, код пуних носача, врши искључиво заваривањем. Међутим, неопходно је познавање и закованих носача, јер се првобитно користила та врста технологије израде, због чега и данас постоји много објеката, углавном мостова.

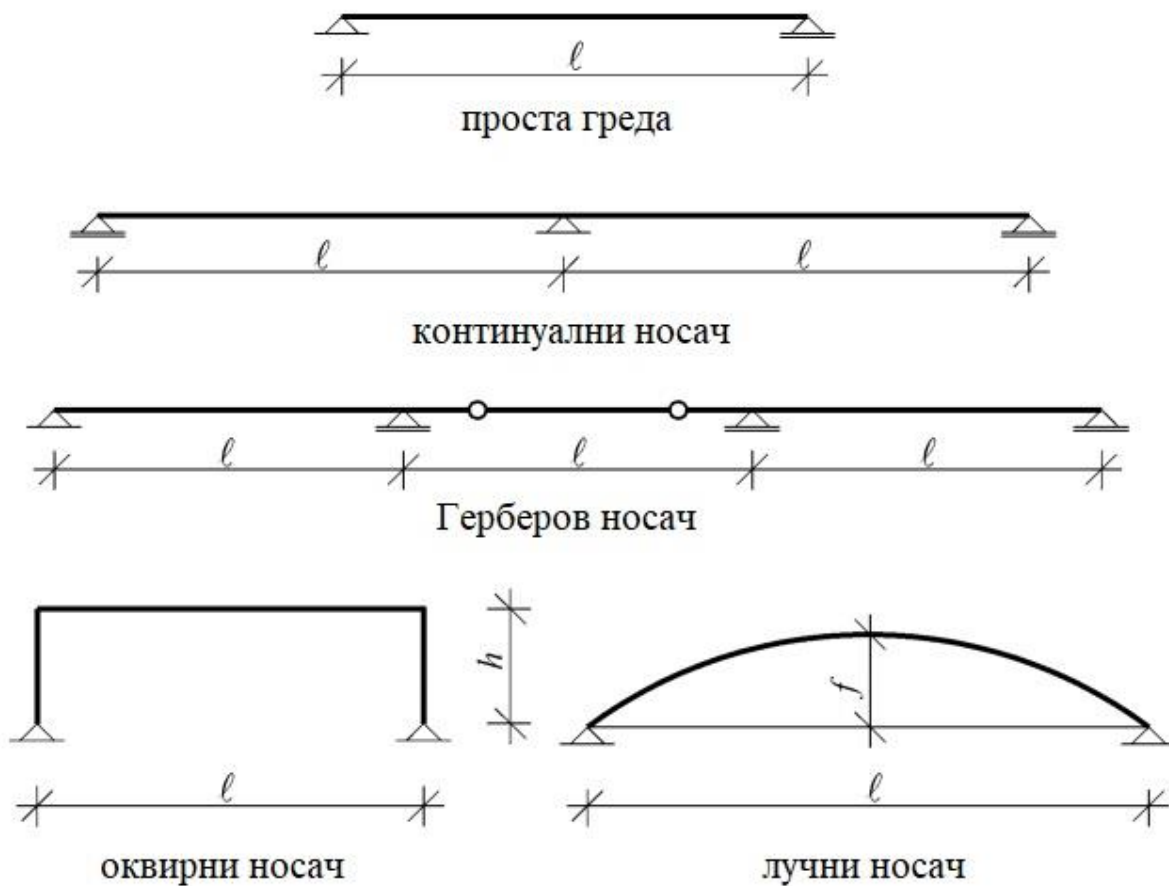


Слика 29 – Различити облици попречних пресека пуних носача, [1]

Карактеристични статички системи пуних лимених носача су, [1]:

- Гредни системи (проста греда и континуални носач)
- Оквирни носачи
- Системи са косим затегама
- Висећи системи.

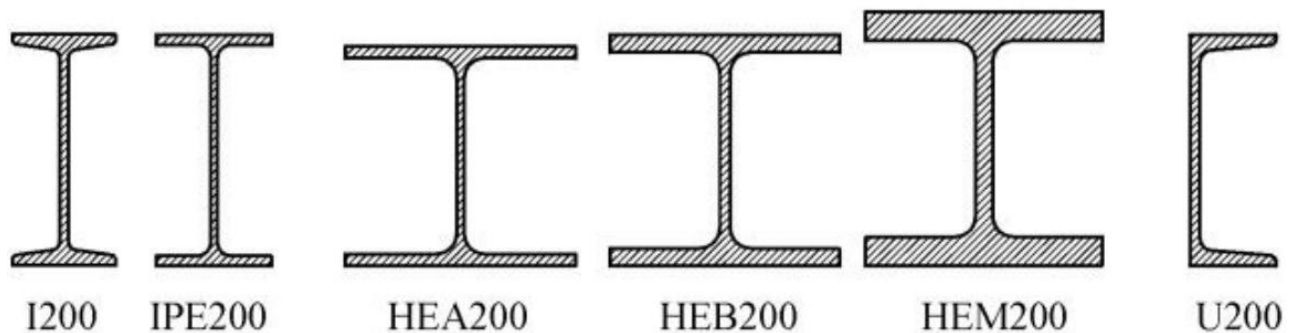
Код статичких система пуних лимених носача најчешћу примену имају гредни носачи, али неретко се користе и оквирни и лучни носачи.



Слика 30 – Статички системи пуних носача, [1]

3.2.1. Пуни носачи израђени од ваљаних профила

Пуни носачи израђени од ваљаних профила проналазе велику примену у зградарству, где су распони релативно мали, а оптерећења мирна и умереног интензитета. У односу на пуне лимене носаче, предност ваљаних се огледа у минимализацији радионичких захвата, па самим тим и трошкова. Мана ваљаних профила је већа тежина од пуних лимених носача. Највећу примену имају I и U – профили, чија извођења се могу видети на слици 31.



Слика 31 – Различити типови ваљаних профила, [1]

Нормални ваљани I – профил, који је до претходних 10 година имао велику примену, замењен је IPE – профилем. Предности у односу на класичан I – профил су следеће, [1]:

- Паралелне стране ножица не захтевају косе подложне плочице, а подвезице се могу поставити са обе стране
- Однос отпорног момента и површине, који осликава рационалност попречног пресека, већи је него код класичног I – профила
- Ножице су шире, па је повећана носивост око слабије осе, а с тим и стабилност на бочно торзионо извијање
- Дебљина ребра је мања него код класичног I – профила.



Слика 32 – Пример конструкције од ваљаних профила, [22]

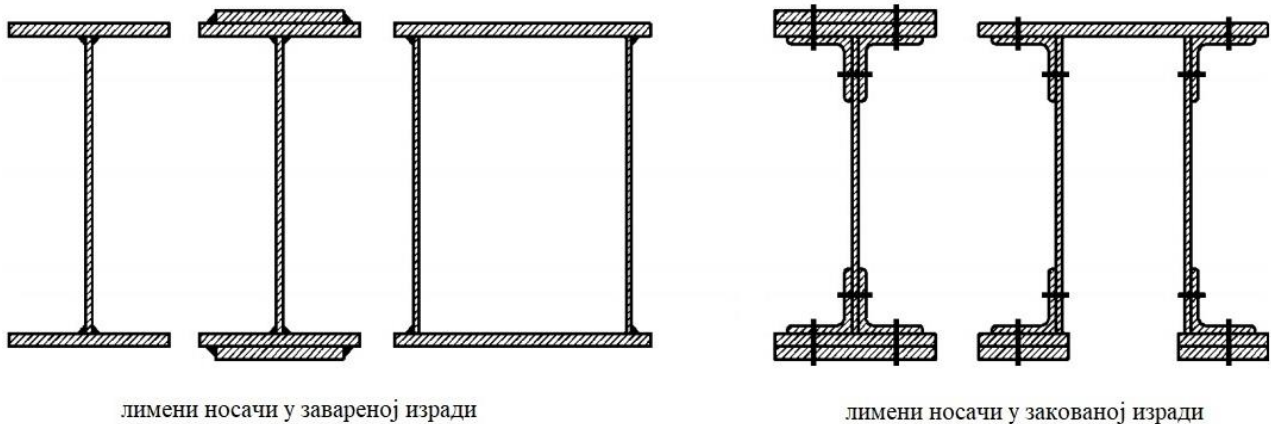
3.2.2. Пуни лимени носачи

Пуни лимени носачи су конструктивни елементи, углавном великих димензија, који се израђују међусобним заваривањем равних или савијених лимова у произвољан попречни пресек. Своју примену проналазе када су распони и оптерећења толико велики да се ваљани профили не могу користити због своје недовољне носивости. Основне предности пуних лимених носача у односу на ваљане су, [9]:

- Мања тежина конструкције
- Велике могућности обликовања попречног пресека
- Савладавање великих распона и прихватање великих оптерећења
- Варирање димензија попречног пресека и прилагођавање димензија пресека стварним потребама (покривање дијаграма момента)
- Могућност оптимизације попречног пресека.

Према облику попречног пресека, лимени носачи могу да буду:

- Једнозидни (отвореног попречног пресека)
- Вишезидни (отвореног или затвореног – сандучастог попречног пресека)



Слика 30 – Попречни пресеци пуних лимених носача, [1]

Када је реч о завареним носачима појасне ламеле се директно заварују за ребро, док се код закованих њихова веза остварује помоћу појасних угаоника и закивака. Пуни лимени носачи у завареној изради имају низ предности у односу на заковане, а најбитније су, [1]:

- Мања тежина
- Бржа и једноставнија израда
- Мања јединична цена
- Јефтинија антикорозиона заштита...

Због свих ових предности у односу на заковане лимене носаче, данас се искључиво користе пуни лимени носачи у завареној изведби.



Слика 30 – Пример конструкције од пуних лимених носача, [5]

4. Конструисање и прорачун лимених носача

Пуни лимени носачи формирају се од једног или више ребара и појасних ламела. Положај ребара је уобичајено вертикалан. То једино није случај код појединих сандучастих или вишезидних носача. Висина ребара варира у широком опсегу и зависи од распона носача, интензитета оптерећења и деформационих критеријума. Висина ребара, [9]:

- | | |
|----------------------------------|-------------------|
| – У високоградњи | $h = l/20 - l/35$ |
| – Код друмских мостова | $h = l/15 - l/25$ |
| – Код железничких мостова носача | $h = l/10 - l/15$ |

Са економског гледишта дебљина ребара би требала да буде што мања, јер не утиче много на носивост, а додатно отежава носач. Међутим од површине ребра зависи отпорност носача на смицање, јер ребро прима готово читаву смичућу силу. На основу дугогодишњег искуства у пројектовању конструкција, изведене су формуле за израчунавање дебљине ребра и смернице за њихову препоручену вредност:

$$(3) \quad t_w = 0.025 \cdot \sqrt[3]{V \cdot d}$$

- У функцији висине ребра (h_w) и интензитета напрезања:

$$(4) \quad t_w [mm] = 2 + 2h_w [m], \text{ за мања оптерећења}$$

$$(5) \quad t_w [mm] = 9 + 2.5h_w [m], \text{ за већа оптерећења}$$

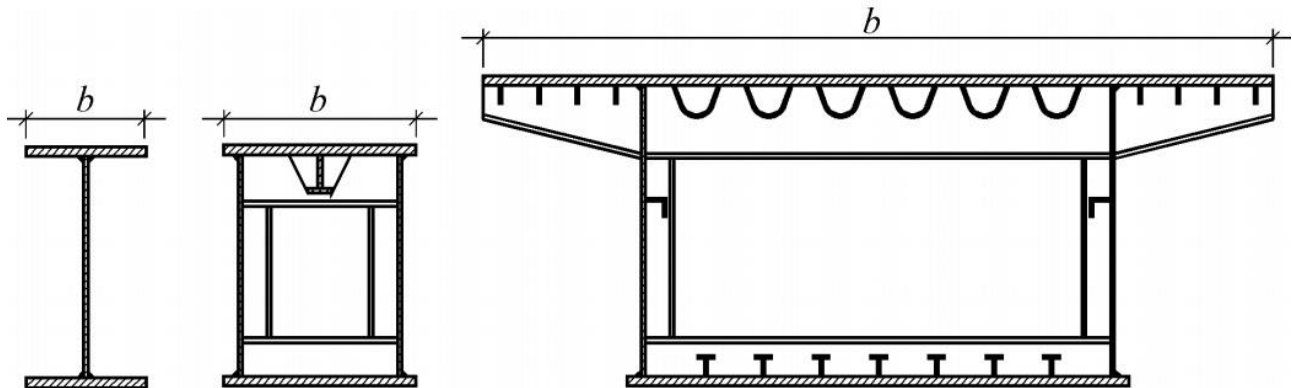
- У функцији висине ребара (h_w):

$$(6) \quad t_w = h_w/120 \quad (S235)$$

$$(7) \quad t_w = h_w/100 \quad (S355)$$

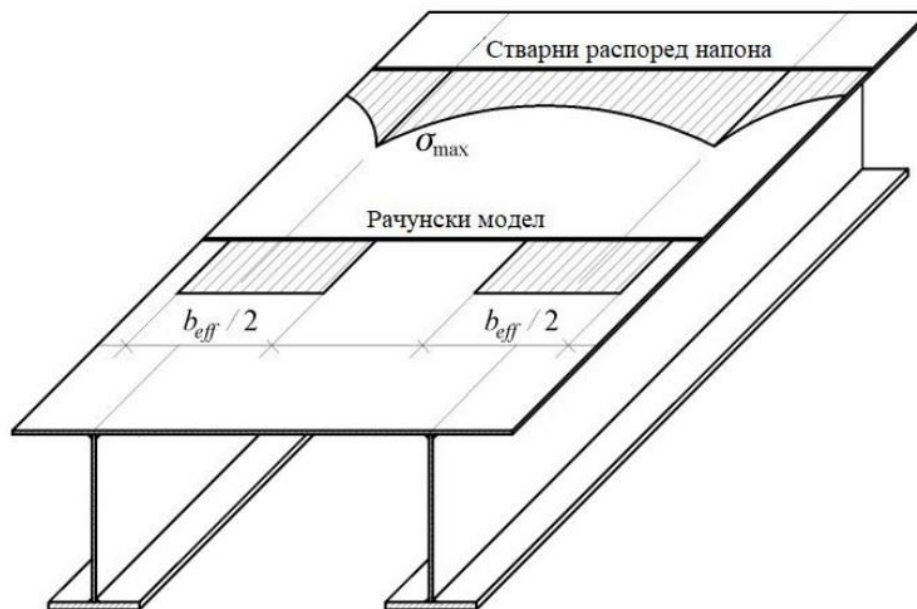
Емпиријски критеријуми за одређивање висине и дебљине ребара који су приказани, представљају само почетну тачку. Правилан избор димензије ребара бива потврђен тек након контроле напона и стабилности носача, [9].

Када је реч о трансверзалној сили, готово читаву прима ребро, за разлику од појасних ламела које прихватају највећи део момента савијања. Како би се створила што већа носивост на савијање, појасеви се израђују са што већом површином. Ширина појасних ламела зависна је од интензитета оптерећења, типа носача, намене носача... Код двозидних и вишезидних носача, површина појасних ламела је знатно већа у односу на површину појаса једнозидних носача.



Слика 31 – Ширина појасних ламела код једнозидних и сандучастих носача, [9]

Када се ради прорачун сандучастих носача широких појаса, изузетно је важно утврдити ефективну ширину појаса, имајући у виду неравномерну расподелу нормалних сила услед утицаја смицања (shear lag ефекат).



Слика 32 – Ефективна ширина појаса, shear lag ефекат, [9]

Shear lag је појава која је карактеристична за широкопојасне елементе и огледа се у различитом интензитету нормалних напона по ширини попречног пресека. Утицаји shear lag ефекта морају бити узети у обзир при граничним стањима носивости, употребљивости или замора, као и утицаји избочавања лимова. Утицаји shear lag ефекта у ножицама у глобалној анализи могу се узети у обзир коришћењем ефективне ширине.

Услед деловања нормалних напона може доћи до избочавања лимова, а то је феномен локалне нестабилности који се јавља кад је танка плоча (равна или закривљена) оптерећена аксијалним притиском у својој равни. Приликом неког критичног оптерећења плоча се деформише управно на своју раван. Након достизања критичног напона избочавања у носачима има још критичне резерве у носивости, што се узима у обзир приликом одређивања носивости на избочавање.

Када је реч о димензијама појасних ламела код једнозидних носача, максимална ширина појасне ламеле условљена је виткошћу конзолног препуста:

$$(8) \quad \lambda_k = c/t_f$$

Како би комплетна ламела била ефективна (класе 3), неопходно је да буде испуњен и услов

$$(9) \quad t_f > c/14\varepsilon$$

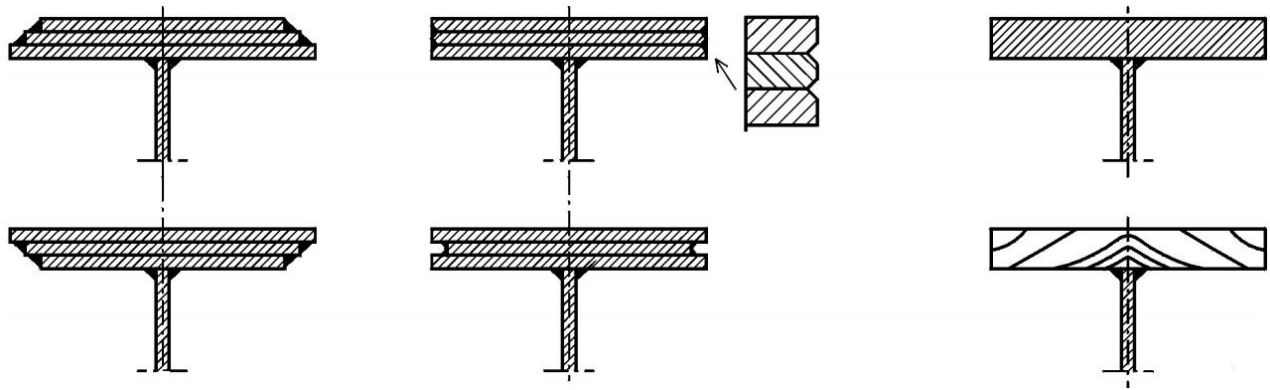
где је c референтна дужина конзолног препуста појасне ламеле (ножице).

Препоручена максимална дебљина појасне ламеле (t_f) је:

- 50 mm за S235
- 30 mm за S355.

Примена квалитетних челика (нормализованих – N, термомеханички ваљаних – М или HISTAR) омогућава коришћење лимова веће дебљине без редукције механичких својстава и проблема са заваривањем, [9].

Површина која је потребна добија се међусобним заваривањем више танких ламела, формирајући један појасни пакет, при чему се препоручују ламеле дебљине од 10mm до 20mm. У појединим случајевима користе се ламеле дебљине и до 30mm (мостоградња). Приликом заваривања више ламела, неопходно је водити рачуна о томе да виткост ламела не треба да буде већа од граничних вредности. Такође, није препоручљива примена више од три појасне ламеле.

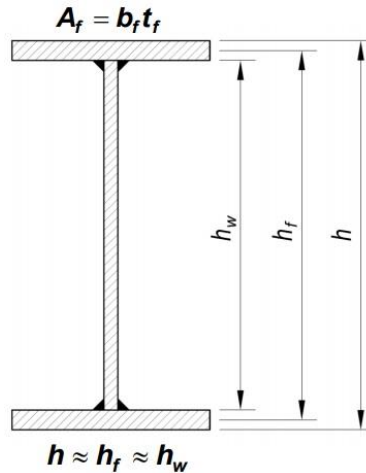


Слика 33 – Облици попречног пресека појасних ламела, [9]

Утврђивање неопходне површине појасних ламела, као почетне претпоставке за даљи прорачун једног пуног лименог носача, заснива се на следећем изразу:

$$(10) \quad W_{y,pot} \geq \frac{M}{\sigma_{dop}}$$

Уколико су висина и дебљина ребра у напред дефинисани, на основу одређених препорука, могуће је одредити потребну површину појаса. Како би се добили једноставнији изрази, који су погодни за брзу употребу, претпоставља се даје висина носача h , као и растојање тежишта појасева, једнака висини ребра d . Обзиром да је код пуних лимених носача висина ребра пуно већа од дебљине појаса, овом претпоставком се нарушава тачност израза, док он бива знатно једноставнији.



Слика 34 – попречни пресек носача са ознакама димензија, [9]

Момент инерције и отпорни момент попречног пресека, уз наведене претпоставке, а у складу са ознакама на слици, одређују се на следећи начин, [?]:

$$(11) \quad I_y = \frac{1}{12} \cdot d^3 \cdot t_w + 2 \cdot A_f \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2$$

$$(12) \quad W_y = \frac{1}{d/2} = \frac{1}{6} \cdot d^2 \cdot t_w + A_f \cdot d$$

Када се у неједначину $W_y \geq \frac{M}{\sigma_{dop}}$ уврсти W_y , према претходном изразу, добија се потребна површина појаса A_f у следећем облику, [9]:

$$(13) \quad A_f \geq \frac{M/d}{\sigma_{dop}} - \frac{1}{6} \cdot d \cdot t_w$$

У литератури се могу пронаћи и алтернативни изрази за израчунавање потребне површине појаса, као што су:

$$(14) \quad A_f \geq 0.9 \frac{M/h}{\sigma_{dop}} - 0.15 \cdot d \cdot t_w$$

У случају да претходно нису дефинисане димензије ребра:

$$(15) \quad A_f \geq 0.9 \frac{M/h}{\sigma_{dop}}$$

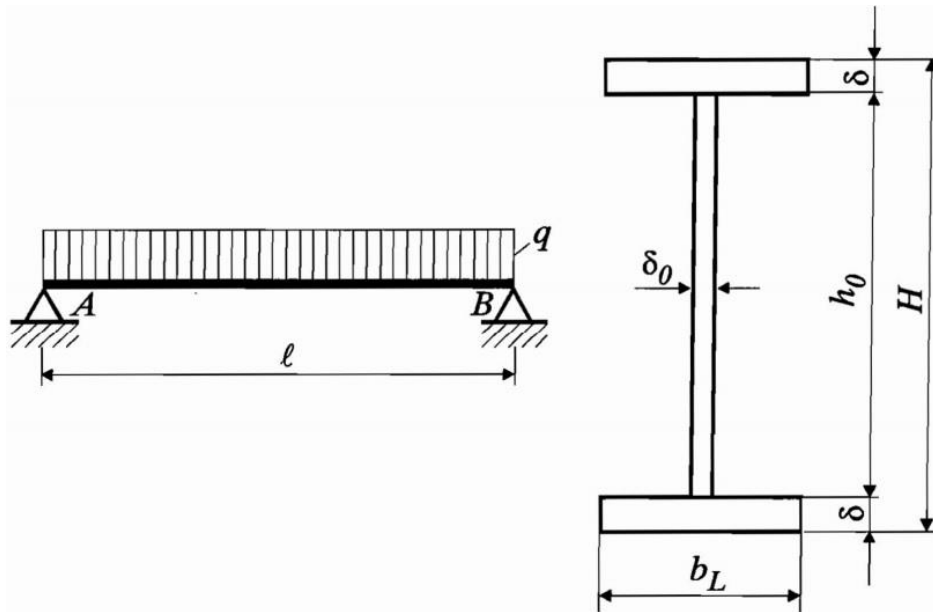
Наведени изрази се користе за прорачун пуних лимених носача у завареној изради, а за пуне лимене носаче у закованој изради неопходно је повећати потребну површину појасних ламела за 10-15%, због њиховог ослабљивања отворима за закивке.

Приликом пројектовања пуних лимених носача неопходно је извршити одређене контроле,[9]:

- Гранична стања носивости – ULS:
 - Контрола носивости попречних пресека (V_{Rd}, M_{Rd})
 - Контрола носивости носача на бочно – торзионо извијање ($M_{b,Rd}$)
 - Контрола локалног напрезања (на пример од притиска точка код кранских носача и мостова) и интеракција са глобалним напонима
 - Контрола носивости на избочавање (услед нормалних напона, притиска и смицања или локалних попречних концентрисаних сила)
 - Контрола носивости на замор (динамички оптерећене конструкције)
- Гранична стања употребљивости – SLS:
 - Контрола деформација (угиба и обртања)
 - Контрола вибрација (ако је потребно)
 - Контрола напона (ако је потребно)
 - Контроле носивости попречних пресека треба спровести у свим меродавним процесима, за све потенцијално критичне комбинације утицаја.

5. Пример

У овом поглављу приказан је прорачун једног лименог завареног носача распона $l = 15m$. Носач је оптерећен једнако подељеним теретом $q = 130 kN/m$, као што је приказан на слици 35. Попречни пресек носача дат је на истој слици. Допуштени напон је: $\sigma_{dop} = 140MPa$, $\sigma_{u,dop} = 105MPa$, [4].



Слика 35 – Поставка задатка

- Потребна висина носача

За дати проблем усваја се да је висина основног пресека:

$$h_0 = \frac{l}{10} = \frac{15}{10} = 1.5m$$

- Димензије вертикалног лима

За посматрани проблем је:

$$\delta_0 [mm] = 9 + 2.5 \cdot h_0 [mm] = 9 + 2.5 \cdot 1.5 = 12.75mm$$

За дебљину вертикалног лима усваја се $\delta_0 = 12mm$.

- Отпорни момент вертикалног лима

$$W_0 = \frac{h_0^2 \delta_0}{6} = \frac{150^2 \cdot 1.2}{6} = 4500cm^3$$

- Појачање основног пресека ламелама

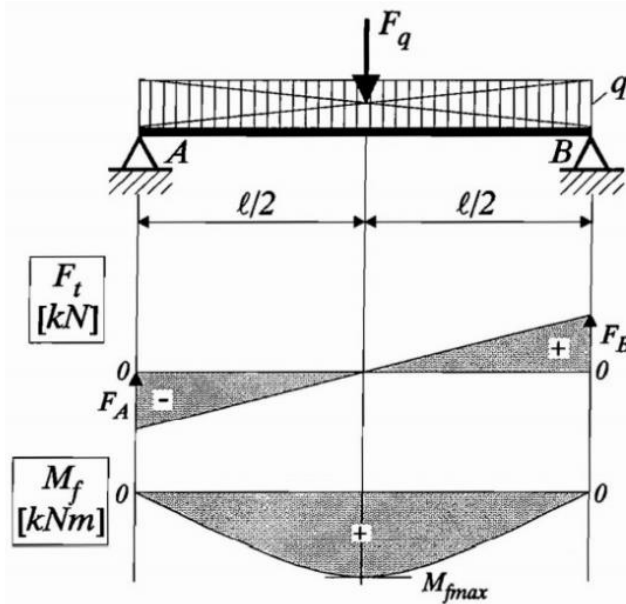
Отпори ослонаца су:

$$\sum F_i = 0 \Rightarrow F_A = F_B = \frac{ql}{2} = \frac{130 \cdot 15}{2} = 975 \text{ kN}$$

Максимални момент савијања је за $z = l/2$ и износи:

$$M_f = M_{fmax} = \frac{ql^2}{8} = \frac{130 \cdot 15^2}{8} = 3360 \text{ kNm}$$

Статички дијаграми за посматрани проблем дати су на слици 36.



Слика 36 – Статички дијаграми

Потребан отпорни момент нето пресека у средини распона, јер је то пресек са највећим моментом савијања, јесте:

$$W_n = \frac{M_{fmax}}{\sigma_{дор}} = \frac{3360 \cdot 10^3}{140 \cdot 10^6} = 26200 \text{ cm}^3$$

Потребна површина нето пресека ојачаног ламелама је:

$$A_p = \frac{W_n}{h_0} - \frac{W_o}{H} = \frac{26200}{150} - \frac{4500}{157} = 145.9 \text{ cm}^2$$

где је: W_o – отпорни момент вертикалног лима;

$$H = h_0 + 2t = 1500 + 70 = 1570 \text{ mm} = 157 \text{ cm};$$

$t = 35 \text{ mm}$ – укупна дебљина свих ламела на највећем делу.

Дакле, усвојене димензије су $\neq 420 \times 35$. Статичке вредности за заварени лимени носач налазе се у табели 8.

- Контрола напона у носачу

Ивични нормални напон у средини распона:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{f\max}}{W_{3n}} = \frac{3360 \cdot 10^3}{26400 \cdot 10^{-6}} = 127.3 \text{ MPa} < \sigma_{\text{dop}} = 140 \text{ MPa}$$

Смичући напон у пресеку десно од ослоња:

Максимална трансверзална сила је $F_T = F_A = F_B = 975 \text{ kN}$. У пресеку десно од ослоња, $z = 0$, нема ламела. Смичући напон је:

$$\tau_{\max} = \frac{F_A \cdot S_x}{I_x \cdot \delta_0} = \frac{975 \cdot 9760}{1307900 \cdot 1.2} = 60.6 \text{ MPa} < 0.6 \cdot \sigma_{\text{dop}} = 84 \text{ MPa}$$

С обзиром на то да су оба напона мања од одговарајућих допуштених напона усвојени носач задовољава.

- Одређивање теоријских дужина ламела

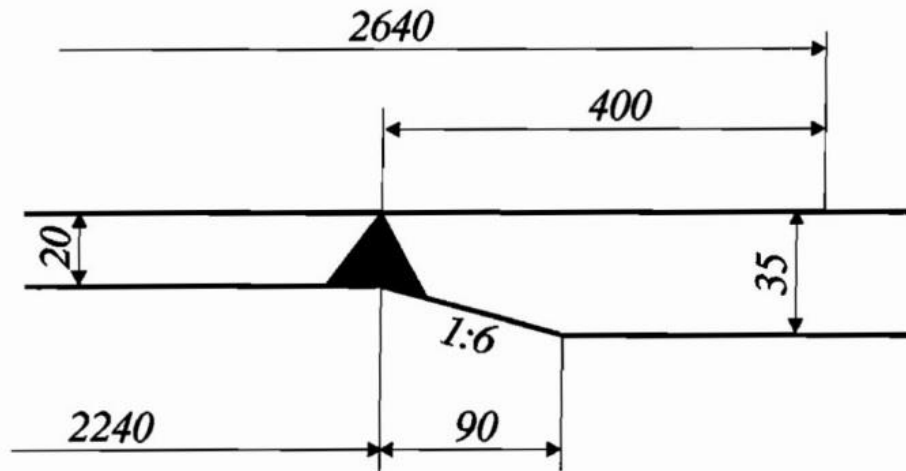
$$x = \frac{0.88l}{2} \cdot \left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{M_{\text{nosiv}}}{M_{\max}}} \right)$$

$$x = \frac{0.88 \cdot 15}{2} \cdot \left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{2350}{3660}} \right) = 2.64 \text{ m}$$

Теоријска дужина средње ламеле: $l - 2x = 15 - 2 \cdot 2.64 = 9.72 \text{ m}$

- Контрола упоредног напона у шавовима за везу вертикалног лима и ламеле

Најосетљивије место у конструкцији биће на месту почетка средње дебеле ламеле. Ту је исцрпна моћ ношења пресека са првом ламелом, а попречна сила која изазива смичући напон је знатна тако да упоредни напон може прећи границу дозвољеног. Због тога се место наставка помера ка ослоњу за ширину ламеле, а у овом случају за 0.4 m . То се може видети на слици 37.



Слика 37 – Теоријски почетак дебље ламеле

На том месту је трансверзална сила:

$$F_t = F_A - qx = 975 - 130 \cdot 2.24 = 683.8 \text{ kN}$$

- Напон на месту наставка у шавовима за везу ребра и подвезе

$$\sigma_u = V_{II} = \frac{F_t \cdot S_x}{I_x \cdot 2a} = \frac{683.8 \cdot 9760}{1307900 \cdot 2 \cdot 0.6} = 42.6 \text{ MPa}$$

где је: I_x – момент инерције основног пресека (табела 8)

S_x – статички момент основног пресека (табела 8)

$a = 6 \text{ тт}$ – дебљина шав.

Упоредни напон је:

$$\sigma_u = 42.6 \text{ MPa} < \sigma_{u, \text{dop}} = 105 \text{ MPa}$$

- Контрола напрезања шавова у пресеку непосредно поред ослонца

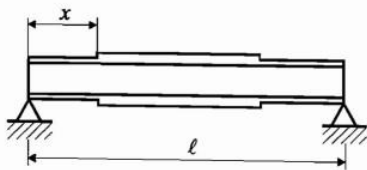
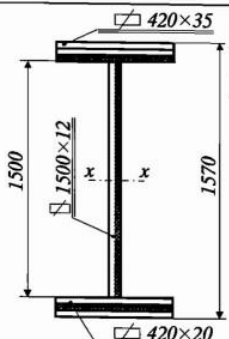
На том месту трансверзална сила је:

$$F_t = F_A = 975 \text{ kN}$$

па је упоредни напон:

$$\sigma_u = V_{II} = \frac{F_t \cdot S_x}{I_x \cdot 2a} = \frac{975 \cdot 9760}{1307900 \cdot 2 \cdot 0.6} = 61 \text{ MPa} < \sigma_{u, \text{dop}} = 105 \text{ MPa}$$

Табела 8 – Статичке вредности за заварени лимени носач, [3]

Redni broj			Podaci za površine		Podaci za statičke momente			Podaci za momente inercije		Podaci za otporne momente i momente nosivosti			
			Delovi pojedinačno	Ukupno	Odstojanje težišta elemenata od težišta preseka	Statički moment elementa	Ukupno	I_x elemenata preseka	Suma momenata I_x preseka elemenata	Visina	Otporni moment W_n neto preseka	Moment nosivosti $W_n \sigma_{max}$	Najveći napon
	Skica poprečnog preseka	Dimenzije	cm ²	cm ²	cm	cm ³	cm ³	cm ⁴	cm ⁴	cm	cm ³	kNm	MPa
1	2	3	4	5	6	7	8	10	13	14	15	16	17
1		Vertikalni lim 1500x12	180		37,5	3375		337500					
		750x12	90										
2		Prva lamela 420x20	168		76	6384	9760	970400	1307900	77	17000	2350	138
Druga lamela 420x35		294		76,75	11282	14657	1732000	2069500	78,5	264000	3660		
3		420x35	147	542									

Закључак

Све конструкције се пројектују на такав начин да могу поднети разне врсте оптерећења и спољашњих утицаја уз што мањи утрошак материјала, јер су од велике важности и економски аспекти. На исти начин се опходи и са лаким металним конструкцијама, с тим да се оне једино по мањој маси разликују од уобичајених машинских конструкција. Металне конструкције се могу израђивати на два начина: као вруће обликовани производи (штапови, лимови, профилисани носачи, шупљи профили) и као хладно обликовани производи. Када је реч о филозофији прорачуна може се уочити да се прорачун носивости, провера стабилности и моделирање конструкција, као и понашање веза некада вршило само аналитички што је веома дуготрајан и комплексан процес. Приликом конструсања неопходно је обратити пажњу на одређене врсте оптерећења, а то су: сопствена тежина конструкције чија вредност се добија правилним избором материјала и логичним искоришћењем попречних пресека, покретна и додатна оптерећења попут корисног оптерећења, оптерећења ветром, оптерећења снегом, температурних утицаја, сеизмичких оптерећења. Покретна и додатна оптерећења могу бити веома непредвидива, те се усвајају на основу мерења током дугог низа година за одређено подручје. Елементи конструкција који су оптерећени на савијање називају се носачи и они могу бити решеткисти и пуни носачи. Решеткисти носачи се користе у случајевима када конструкција треба да пренесе оптерећење преко великог распона или дохвата. Овакав тип носача је идеалан када су у питању велики распони, а оптерећени претежно статичким оптерећењем. Када је реч о пуним носачима, углавном се користе стандардни ваљани профили или за носаче већих димензија пуни лимени носачи који су образовани спајањем равних челичних лимова помоћу прикључних угаоника и закивака или директним заваривањем. Неопходно је и познавање носача у закованој изради због великог броја објеката који су у прошлости израђени на такав начин. Пуни носачи израђени од ваљаних профила своју примену проналазе када су распони релативно мали, а оптерећења мирна и умереног интензитета, док се пуни лимени носачи користе када су распони и оптерећења толико велики да се ваљани профили не могу користити, због своје недовољне носивости. Димензије лимених носача могу бити знатно веће и нису ограничене произвођачким спецификацијама. Заваривање је данас потиснуло носаче заковане израде јер су заварени носачи компактнији, лакши, једноставнији иза прорачун и извођење. Мана је једино што нису демонтажни и потребна је квалификованија радна снага па самим тим су и скупљи.

При пројектовању носача неопходно је спровести одређене контроле конструкције прописане стандардима. Пример аналитичког прорачуна и провере стабилности једног пуног завареног лименог носача дат је на крају рада.

Литература

- [1] Буђевац Д., Марковић З. и др., Металне конструкције, Грађевинска књига, Београд, 2007.
- [2] Петковић З., Острић Д., Металне конструкције у машиноградњи 1, Институт за механизацију Машинског факултета у Београду, Београд, 1996.
- [3] Николић Р., Марјановић В., Металне конструкције – Приручник за прорачуне, Машински факултет, Крагујевац, 1998.
- [4] Николић Р., Вељковић Ј., Марјановић В., Металне конструкције – збирка решених задатака, Машински факултет, Крагујевац, 2013.
- [5] Филип Богдановић, Пројектовање пуног лименог носача коришћењем Еврокод стандарда, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2019.
- [6] Интернет страница: <http://skr.rs/5Ld> , приступљено: септембар 2020.
- [7] Интернет страница: <http://skr.rs/5Lo> , приступљено: септембар 2020,
- [8] Интернет страница: <http://skr.rs/5LC> , приступљено: септембар 2020.
- [9] Интернет страница: <http://skr.rs/5LW> , приступљено: септембар 2020.
- [10] Интернет страница: <http://skr.rs/5L1> , приступљено: септембар 2020.
- [11] Интернет страница: <http://skr.rs/5Lh> , приступљено: септембар 2020.
- [12] Интернет страница: <http://skr.rs/5Lq> , приступљено: септембар 2020.
- [13] Интернет страница: <http://skr.rs/5LA> , приступљено: септембар 2020.
- [14] Интернет страница: <http://skr.rs/5Lp> , приступљено: септембар 2020.
- [15] Интернет страница: <http://skr.rs/5L9> , приступљено: септембар 2020.
- [16] Интернет страница: <http://skr.rs/5L5> , приступљено: септембар 2020.
- [17] Интернет страница: <http://skr.rs/5LP> , приступљено: септембар 2020.
- [18] Интернет страница: <http://skr.rs/5L6> , приступљено: септембар 2020.
- [19] Интернет страница: <http://skr.rs/5Fz> , приступљено: септембар 2020.
- [20] Интернет страница: <http://skr.rs/5Fa> , приступљено: септембар 2020.
- [21] Интернет страница: <http://skr.rs/5Fs> , приступљено: септембар 2020.
- [22] Интернет страница: <http://skr.rs/5Fn> , приступљено: септембар 2020.