

SELECTION OF ECONOMIC CROSS-SECTION OF PRECAST REINFORCED CONCRETE PURLINS

ИЗБОР ЕКОНОМИЧНОГ ПРЕСЕКА ПРЕФАБРИКОВАНИХ АРМИРАНОБЕТОНСКИХ РОЖЊАЧА

Danica Goleš¹
Đerđ Varju²
Oliver Vajda³

UDK: 624.012.35.03:658.7.03
DOI: 10.14415/zbornikGFS31.002
CC-BY-SA 4.0 license

Summary: The selection of the cross section of precast reinforced concrete (RC) purlins is performed in the function of their span and load, while the spacing of these elements is chosen according to the bearing capacity and deformability of the roof cover. This paper presents an analysis of the consumption and price of the materials for the production of precast RC purlins of 6.0 m span for different spacing, shapes and dimensions of the cross section, aiming to achieve the minimum total cost of materials for production of the purlins of a two-bay hall, with meeting the requirements of resistance, serviceability and durability.

Keywords: Precast reinforced concrete purlins, economical shape, material consumption

1. INTRODUCTION

The most important condition which, from the aspect of the constructor, one structure should fulfill is its reliability. On the other hand, a demand that, in addition to its functionality, is of the greatest interest for the investor is its

Резиме: Избор попречног пресека префабрикованих АБ рожњака врши се у функцији њиховог распона и оптерећења, док се размак ових елемената бира према носивости и деформабилности кровног покривача. У раду је приказана анализа утрошка и цене материјала за израду префабрикованих АБ рожњака распона 6.0 m, за различите размаке, облике и димензије попречног пресека, чији је циљ био постизање минималне укупне цене материјала за извођење рожњака једне двобродне хале, уз испуњење захтева носивости, употребљивости и трајности.

Кључне речи: Префабриковане армиранобетонске рожњаче, економичан облик, утрошак материјала

1. УВОД

Најважнији услов који, са аспекта конструктора, треба да испуни једна конструкција је њена поузданост. Са друге стране, захтев који, поред функционалности, највише занима инвеститора је економичност, која се

¹ Danica Goleš, PhD, Assistant Professor, University of Novi Sad, Faculty of Civil Engineering Subotica, Kozaračka 2a, Subotica, Serbia, tel: +381 24 554 300, e – mail: dgoles@gf.uns.ac.rs

² Đerđ Varju, MSc, University of Novi Sad, Faculty of Civil Engineering Subotica, Kozaračka 2a, Subotica, Serbia, tel: +381 24 554 300, e – mail: varjuqv@gf.uns.ac.rs

³ Oliver Vajda, Civ. Eng., student of Master studies at University of Novi Sad, Faculty of Civil Engineering Subotica, Kozaračka 2a, Subotica, Serbia, tel: +381 24 554 300, e – mail: voliver1993@gmail.com

economy, which is most often reduced to the minimum cost of construction and use of the facility. In order to meet these two basic requirements, a number of alternative solutions, which are selected based on the experience of the designer and recommendations from the literature ([1], [2]), are considered when designing a structure.

The production of reinforced concrete and prestressed elements in the prefabrication plants has a number of advantages over the production of the elements by *in-situ* concrete casting [1]. From the aspect of economy, the cost-effectiveness of selecting more complex shapes of cross section of the elements is especially emphasized. By using T or I cross sections instead of rectangular ones, the lighter elements of equal bearing capacity are obtained, along with lower concrete consumption. However, the selection of more complex cross sections does not necessarily mean more cost-effective structure, as shown in the analysis that will be presented in this paper.

The undergraduate academic studies final thesis topic of the third author of this paper was the design of RC structure of a precast two-bay hall with dimensions of the base 2x17x42 m [3]. In the thesis, the dimensions of precast RC elements are adopted on the basis of the recommendations from the literature, conservatively. In further dimensioning of the elements, it turned out that the cross sections are largely unutilized and therefore the reinforcement was adopted according to the minimum percentage of reinforcement. In order to achieve a more rational solution, attention is directed at the purlins, as the most numerous elements in the structure, which can significantly affect its total cost. In [4] and [5], the influence of the spacing and shape of the cross section (and, in relation to this, the dimensions) of the purlins on material consumption per m² of the base area of the hall, was analyzed. The analysis showed that for the given location and

најчешће своди на минималну цену израде и експлоатације објекта. Да би се испунила ова два основна захтева, приликом пројектовања конструкције разматра се већи број алтернативних решења, која се бирају на основу препорука из литературе ([1], [2]) и искуства самог пројектанта.

Израда армиранобетонских и претходно напрегнутих елемената у погонима за префабрикацију има низ предности у односу на извођење елемената ливењем бетона на лицу места [1]. Са аспекта економичности посебно се истиче исплативост избора сложенијих облика попречног пресека елемената. Применом Т или I пресека уместо пуних правоугаоних добијају се лакши елементи једнаке носивости, уз мањи утросак бетона. Међутим, избор сложенијих попречних пресека не значи нужно и економичнију конструкцију, као што је показала анализа која ће бити приказана у овом раду.

Тема завршног рада основних академских студија трећег аутора овог рада је била израда пројекта АБ конструкције монтажне двобродне хале димензија основе 2x17,0x42,0 m [3]. У пројекту су димензије префабрикованих АБ елемената усвојене на основу препорука из литературе, конзервативно. При даљем димензионисању елемената показало се да су пресеци махом неискоришћени, те је арматура усвајана према минималним процентима армирања. У циљу постизања рационалнијег решења пажња је усмерена на рожњаче, као најбројније елементе у конструкцији, који могу значајно утицати на њену укупну цену. У [4] и [5] је анализан утицај размака и облика попречног пресека (а с тим у вези и димензија) рожњача на утросак материјала по m² основе хале. Анализа је показала да се за дату локацију и изабрани тип кровног покривача и размак попречних рамова најнижа цена материјала за извођење рожњача

the selected type of the roof cover and the spacing of the transverse frames, the lowest price of the material for the production of the purlins is achieved by selecting a rectangular cross section.

2. ANALYSIS PROCEDURE

The objective of the analysis is the selection of the spacing, shape and dimensions of the cross section of the precast RC purlins that meets the requirements of resistance, serviceability and durability, with a minimum total material cost per m^2 of the base area of the hall. As the required degree of fire resistance is not defined in the project task, this condition is not further considered.

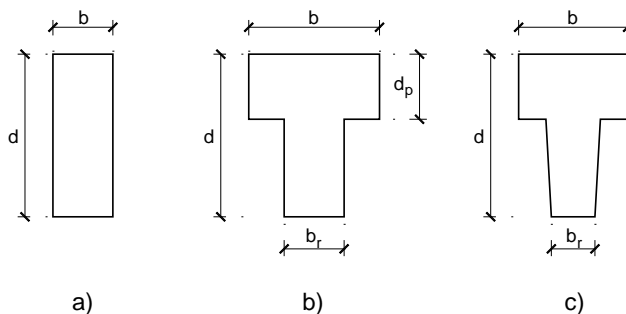
The hall is located in the urbanized part of Subotica. In addition to the self-weight of roof cover and the purlins, the snow load $s_0 = 0.75 \text{ kN/m}^2$ and the maximum wind load $q_{w,max} = 0.464 \text{ kN/m}^2$ are included in the analysis. The span of purlins is constant $l = 6.0 \text{ m}$, determined by the spacing of the main roof girders - beams of the transverse frames. Roof cover consists of steel sandwich panels, whose thickness is determined for each analyzed purlin spacing separately. Four realistically possible purlin spacing were selected: $\lambda = 163.5; 204; 272.5$ and 408 cm , for $n = 10, 8, 6$ and 4 purlins along one field and one bay of the hall.

постиже избором правоугаоног попречног пресека.

2. ПОСТУПАК АНАЛИЗЕ

Циљ анализе је избор размака, облика и димензија попречног пресека префабрикованих АБ рожњача који испуњава захтеве носивости, употребљивости и трајности, уз минималну укупну цену материјала по m^2 основе објекта. Како у пројектном задатку није дефинисан захтевани степен отпорности на пожар, овај услов даље није разматран.

Објекат је лоциран у урбанизованом делу Суботице. Поред сопствене тежине кровног покривача и самих рожњача, анализом је обухваћено оптерећење од снега $s_0 = 0.75 \text{ kN/m}^2$ и максимално оптерећење од ветра $q_{w,max} = 0.464 \text{ kN/m}^2$. Распон рожњача је константан, одређен размаком главних кровних носача - ригли попречних рамова, и износи $l = 6.0 \text{ m}$. Кровни покривач су челични сендвич панели, чија се дебелина одређује за сваки посматрани размак рожњача посебно. Изабрана су четири реално могућа размака рожњача: $\lambda = 163.5; 204.0; 272.5$ и 408 cm , за $n = 10, 8, 6$ и 4 рожњаче дуж једног поља и једног брода хале.



Слика 1 – Анализирани облици попречног пресека: а) правоугаони; б) T1 и с) T2
 Figure 1 – Analyzed shapes of cross-section: a) rectangular; b) T1 and c) T2

Three shapes of the cross section (Fig. 1) were analyzed, for which the initial height $d = l/20$ was adopted, as the lowest value based on the recommendations from the literature, while the rib width b_r and the width of the cross section/flanges, b was adopted according to (1).

$$\begin{aligned} b &= d/3 && \text{- за правоугаони пресек / for rectangular section ,} \\ b &= 0.8d; \quad b_{r,\min} = 11 \text{ cm} && \text{- за T1 пресек / for T1 section ,} \\ b_{\min} &= 20 \text{ cm}; \quad b_{r,\min} = 8 \text{ cm} && \text{- за T2 пресек / for T2 section} \end{aligned} \quad (1)$$

In cases where rib width calculated in this way is not sufficient to fit the reinforcement according to the design rules given in ПБАБ'87 [6], it is increased to a value that ensures the minimum concrete cover and the minimum spacing of the longitudinal bars. Thickness of flanges of the T1 and T2 cross sections was adopted as constant: $d_p = 15$ cm.

For each analyzed purlin spacing, with the adopted minimum cross sectional height d , the reinforcement area according to the ultimate limit state (ULS) is first determined, along with the control of the conditions of the minimum (according to [6]) and the maximum reinforcement ratio (according to Eurocode 2 [7] and [8]). Then, the calculation is done according to the serviceability limit states (SLS). If the crack width limit $a_u = 0.2$ mm and/or the deflection limit $\delta_u = l/300 = 2$ cm is exceeded, the whole calculation is repeated with the increased height d and other dimensions of the cross section proportionally, according to (1) or with the changed reinforcement in the cross section. This procedure is repeated for each spacing and shape of the purlins until all limit states (ULS and SLS) are met.

Анализирана су три облика попречног пресека (слика 1), за које је усвојена почетна висина $d = l/20$, као најмања вредност на основу препорука из литературе, док су ширина ребра b_r и ширина пресека, односно фланши, b усвајане према (1).

У случајевима када овако срачуната ширина ребра није довољна за смештај арматуре према правилима за обликовање датим у ПБАБ'87 [6], иста се повећава на вредност којом се обезбеђују минимални заштитни слој бетона и минимални размаци подужних шипки. Дебљина фланши T1 и T2 пресека је усвојена константна: $d_p = 15$ cm.

За сваки анализирани размак рожњача прво се са усвојеном минималном висином пресека d одређује површина арматуре према граничном стању носивости (ГСН), уз контролу услова минималног (према ПБАБ'87 [6]) и максималног процента армирања (према Еврокоду 2 [7] и [8]). Затим се врши прорачун према граничним стањима употребљивости (ГСУ). Ако је прекорачена гранична ширина прслина $a_u = 0.2$ mm и/или гранични угиб $\delta_u = l/300 = 2.0$ cm, цео прорачун се понавља са повећаном висином d и осталим димензијама пресека сразмерно, према (1) или са промењеном арматуром у пресеку. Овај поступак се понавља за сваки размак и облик рожњача све док сва гранична стања (ГСН и ГСУ) не буду задовољена.

3. ANALYSIS RESULTS

The results of the calculation are shown in Tables 1 to 3. For each analyzed spacing the dimensions of the cross section d , b and b_r are adopted by using the method described in the previous chapter. The compressive strain of the upmost concrete fiber ε_b and the required reinforcement area A_{a1} were determined by the process of associated dimensioning, after which the reinforcement of $usvA_{a1}$ area was adopted. The shaded fields refer to the cross sections that meet all limit states, i.e. those for which the crack width a_k and the deflection in the middle of the span δ do not exceed the limit values.

3. РЕЗУЛТАТИ АНАЛИЗЕ

Резултати прорачуна приказани су у табелама 1 до 3. За сваки анализирани размак усвојене су димензије попречног пресека d , b и b_r на начин описан у претходном поглављу. Дилатација у крајњем притиснутом влакну бетона ε_b и потребна површина арматуре A_{a1} одређене су поступком везаног димензионисања, након чега је усвојена арматура површине $usvA_{a1}$. Засенчена поља се односе на пресеке који задовољавају сва гранична стања, тј за које карактеристична ширина прслине a_k и угиб на средини распона δ не прекорачују граничне вредности.

Табела 1 – Димензионисање рожњаче правоугаоног попречног пресека
Table 1 – Design of purlins with rectangular cross-section

Пресек/ Section	λ [m]	b [cm]	d [cm]	ε_b [‰]	A_{a1} [cm ²]	Усвојено/ Adopted	$usvA_{a1}$ [cm ²]	a_k [mm]	δ [cm]
1	1.635	11	30	2.544	2.42	4RØ10	3.14	0.109	1.987
2	1.635	12	30	2.544	2.47	4RØ10	3.14	0.109	2.154
3	1.635	12	32	2.27	2.32	4RØ10	3.14	0.102	1.78
4	2.044	12	30	3	2.96	4RØ10	3.14	0.133	2.555
5	2.044	12	32	2.639	2.76	4RØ10	3.14	0.122	2.127
6	2.044	12	34	2.4	2.65	4RØ10	3.14	0.116	1.874
7	2.725	12	35	2.563	3.26	4RØ12	4.52	0.1	1.803
8	4.08	15	35	2.9	4.62	4RØ14	6.16	0.116	1.965

Табела 2 – Димензионисање рожњаче Т1 пресека
Table 2 – Design of purlins with T1 cross-section

Пресек/ Section	λ [m]	b [cm]	b_r [cm]	d [cm]	ε_b [‰]	A_{a1} [cm ²]	Усвојено/ Adopted	$usvA_{a1}$ [cm ²]	a_k [mm]	δ [cm]
1	1.635	24	11	30	1.442	2.68	4RØ10	3.14	0.123	2.253
2	1.635	26	11	32	1.413	2.57	4RØ10	3.14	0.046	1.919
3	2.044	26	11	32	1.571	3.02	4RØ10	3.14	0.138	2.27
4	2.044	26	12	34	1.438	2.82	4RØ10	3.14	0.133	1.913
5	2.725	26	12	34	1.629	3.57	4RØ12	4.52	0.119	1.968
6	4.08	26	14	34	2.089	4.99	4RØ14	6.16	0.124	1.916

Табела 3 – Димензионисање рожњаче Т2 пресека
Table 3 – Design of purlins with T2 cross-section

Пресек/ Section	λ [m]	b [cm]	b _r [cm]	d [cm]	ε_b [‰]	A _{a1} [cm ²]	Усвојено/ Adopted	usvA _{a1} [cm ²]	a _k [mm]	δ [cm]
1	1.635	20	8	32	1.688	2.56	2RØ14	3.08	0.101	1.928
2	1.635	22	8	34	1.7	2.84	2RØ14	3.08	0.113	1.929
3	1.635	20	8	30	1.79	2.57	1RØ19	2.84	0.094	2.021
4	1.635	20	8	30	1.79	2.57	1RØ22	3.8	0.092	1.777
5	2.044	20	8	32	1.811	2.81	1RØ19	2.84	0.129	2.021
6	2.044	20	8	32	1.811	2.81	1RØ22	3.8	0.101	1.758
7	2.044	20	8	30	2	3.00	1RØ22	3.8	0.109	2.05
8	2.725	22	8	34	1.82	3.35	1RØ22	3.8	0.121	1.865
9	4.08	26	10	34	2.42	5.27	2RØ22	7.6	0.095	1.907

The consumption of steel and the total cost of the materials are also influenced by the stirrups, which, in addition to their function of cross-sectional confinement, can also take over a part of the shear stresses. The value of the shear stresses depends on the way the purlin ends are shaped, i.e. the way the purlin relies on the main roof girders. It is common for the purlins of T1 and T2 cross sections to rely over the flange, while the rectangular cross sections are "incised" in the support zone, thereby achieving the lowering of the element's center of gravity below the support level, i.e. their lateral stability in all stages of production and exploitation. In the case of supporting the elements over the rib, additional steel elements are needed to ensure stability of the purlins in the transverse direction. When calculating the price of the materials, these elements must be taken into account as well. In the conducted analysis, the usual way of shaping the ends of the purlins is adopted. In the places where it was necessary, the stirrups were set denser, determined by the shear stresses.

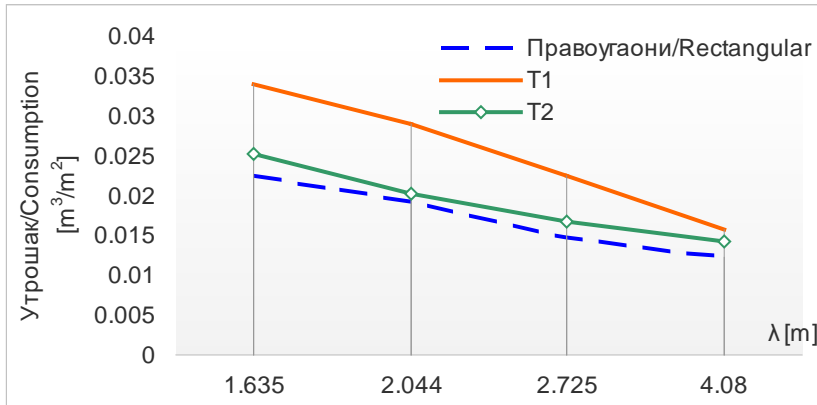
For the shapes and dimensions of the cross section and the longitudinal section adopted in this way, as well as the longitudinal reinforcement and the stirrups, the required quantity of

На утрошак челика и укупну цену материјала имају утицаја и узенгије, које поред улоге утезања пресека могу да преузму и део смичућих напона услед трансверзалних сила. Величина смичућих напона зависи од начина обликовања крајева рожњаче, односно начина ослањања рожњаче на главне кровне носаче. Уобичајено је да се рожњаче Т1 и Т2 пресека ослањају преко фланше, док се правоугаони пресеци "засецају" у зони ослањања, чиме се постиже спуштање тежишта елемента испод нивоа ослонца, односно њихова бочна стабилност у свим фазама извођења и експлоатације. У случају ослањања елемената преко ребра потребни су додатни челични елементи за осигурање стабилности рожњача у попречном правцу. При прорачуну цене материјала и ови се елементи морају узети у обзир. У спроведеној анализи је усвојен уобичајени начин обликовања крајева рожњача. На местима где је то било потребно постављене су прогушћене узенгије одређене према напонима смицања.

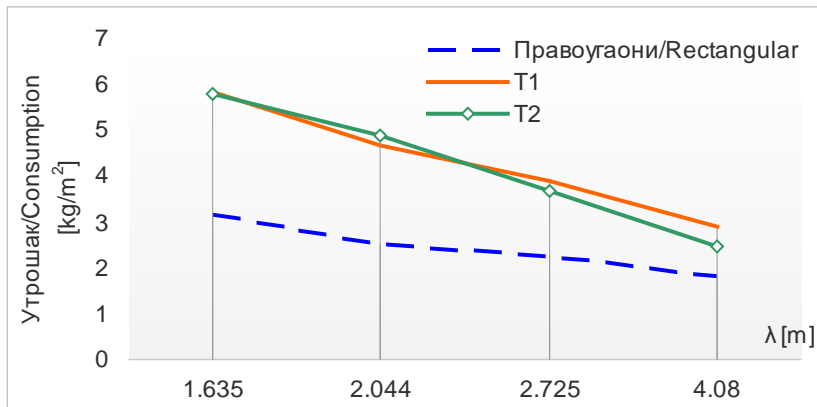
За овако усвојене облике и димензије попречног и подужног пресека, као и подужну арматуру и узенгије, срачуната је потребна количина бетона и челика за арматуру по

concrete and reinforcement steel per unit of the base area of the hall is calculated (Figures 2 and 3). The following unit prices of the materials were adopted: for concrete 80 €/m³ and 0.9 €/kg for reinforcement, with which the price of materials for production of the purlins is calculated, shown in Table 4 and in Figures 4 to 7.

јединици површине основе хале (слике 2 и 3). Усвојене су следеће јединичне цене материјала: за бетон 80 €/m³ и 0.9 €/kg за арматуру, са којима је срачуната цена материјала за израду рожњача, приказана у табели 4 и на сликама 4 до 7.



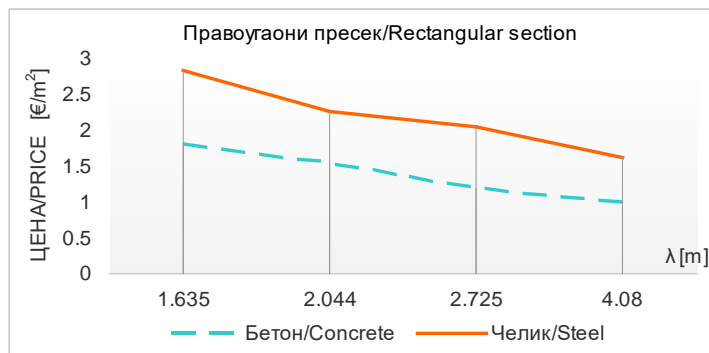
Слика 2 – Утрошак бетона за рожњаче по m² основе хале
Figure 2 – Consumption of concrete for purlins per m² of base area of the hall



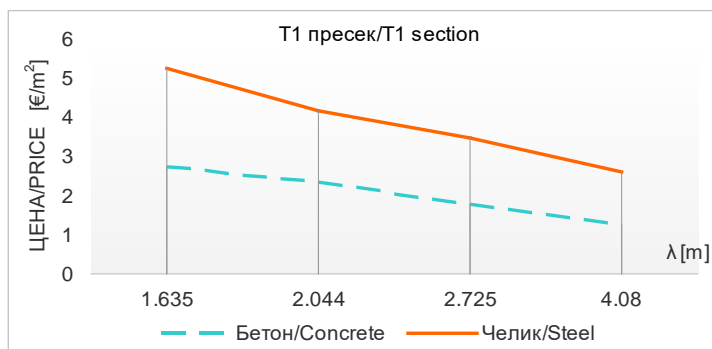
Слика 3 – Утрошак челика за арматуру за рожњаче по m² основе хале
Figure 3 – Consumption of reinforcement steel for purlins per m² of base area of the hall

Табела 4 – Утрошак и цена материјала за рожњаче по m^2 основе хале
 Table 4 – Consumption and price of material for purlins per m^2 of base area of the hall

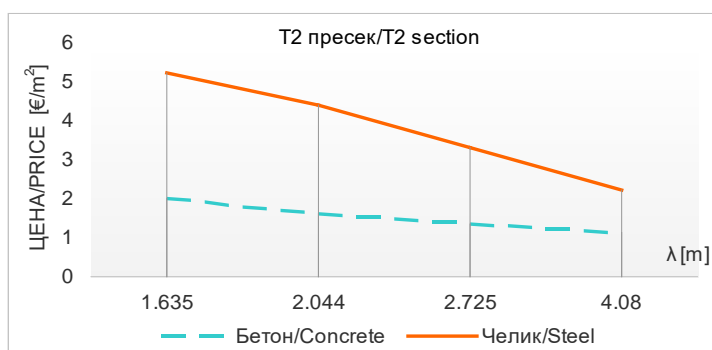
Пресек/ Section	λ [m]	n	Утрошак/Consumption		Цена/Price		Укупна цена/ Total price [€/m ²]
			Бетон/ Concrete [m ³ /m ²]	Челик/ Steel [kg/m ²]	Бетон/ Concrete [€/m ²]	Челик/ Steel [€/m ²]	
Правоугаони пресек/Rectangular cross-section							
3	1.635	10	0.022588	3.14	1.81	2.83	4.63
6	2.044	8	0.0192	2.51	1.54	2.26	3.8
7	2.725	6	0.014824	2.268	1.19	2.04	3.23
8	4.08	4	0.012353	1.816	0.99	1.63	2.62
T1 пресек/T1 cross-section							
2	1.635	10	0.033941	5.822	2.72	5.24	7.96
4	2.044	8	0.029082	4.658	2.33	4.19	6.52
5	2.725	6	0.022447	3.876	1.8	3.49	5.29
6	4.08	4	0.015765	2.888	1.26	2.6	3.86
T2 пресек/T2 cross-section							
1	1.635	10	0.025294	5.795	2.02	5.22	7.24
6	2.044	8	0.020235	4.899	1.62	4.41	6.03
8	2.725	6	0.016694	3.675	1.34	3.31	4.65
9	4.08	4	0.014318	2.45	1.15	2.21	3.36



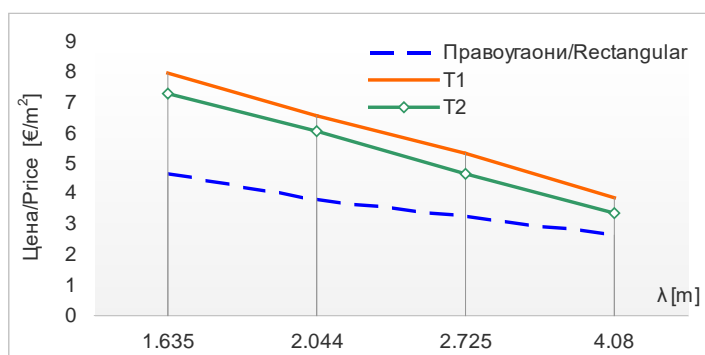
Слика 4 – Цена материјала за рожњаче по m^2 основе хале за правоугаони пресек
 Figure 4 – Price of material for purlins per m^2 of base area of the hall for rectangular section



Слика 5 – Цена материјала за роњаче по m^2 основе хале за Т1 пресек
 Figure 5 – Price of material for purlins per m^2 of base area of the hall for T1 section



Слика 6 – Цена материјала за роњаче по m^2 основе хале за Т2 пресек
 Figure 6 – Price of material for purlins per m^2 of base area of the hall for T2 section



Слика 7 – Укупна цена материјала за роњаче по m^2 основе хале у функцији њиховог размака
 Figure 7 – Total price of material for purlins per m^2 of base area of the hall depending of their distance

4. CONCLUSION

An analysis of the influence of spacing and cross sectional shape on the material consumption for the production of purlins for one hall showed that, although the consumption of concrete and reinforcement per one purlin grows with the increase in their spacing, which is a consequence of the simultaneous increase in the load, due to a decrease in the total number of purlins the consumption of both materials per m² of the hall base is reduced for all considered cross sectional shapes. Nevertheless, there is an evident significantly faster decrease in material consumption with an increase in spacing at the T1 and T2 cross sections. Although in this analysis the rectangular cross section proved to be the best choice, which is at the same time the simplest to produce and has the lowest consumption of the transverse reinforcement, it is to be expected that for the spans and spacing of the purlins larger than those analyzed here, especially in combination with heavy roof covers, the T sections, especially those of the T2 shape, gain the advantage. The material saving due to the reduction of the concrete area in the tensioned zone of the cross-section, achieved by the transition from the rectangular to the T cross section, comes to the fore only at higher load levels.

REFERENCES

- [1] Голеш, Д., Зарић, Р.: Избор диспозиције монтажне бетонске хале, Зборник радова ГФ Суботица, **2014**, № 26, стр. 85-97.
- [2] Goodchild, C. H., Webster, R. M., Elliott, K. S.: Economic Concrete Frame Elements to Eurocode 2, The Concrete Centre, Camberley, Surrey, UK, **2009**.
- [3] Вајда, О.: Пројекат АБ конструкције вишенаменске двобродне хале, Завршни рад основних академских студија, Грађевински Факултет Суботица, **2016**.
- [4] Вајда, О.: Обликовање пресека елемента у функцији економичности, 15. Војвођанска мађарска научна конференција студената, Нови Сад, **2016**.
- [5] Вајда, О.: Избор рационалног облика монтажних АБ рожњача, семинарски рад из предмета Монтажна бетонске конструкције, ментор: Даница Голеш, Грађевински Факултет Суботица, **2017**.
- [6] Правилник о техничким нормативима за бетон и армирани бетон, Службени лист СФРЈ 11/87.

4. ЗАКЉУЧАК

Анализа утицаја размака и облика попречног пресека на утрошак материјала за израду рожњача једне хале је показала да, иако утрошак бетона и арматуре по једној рожњачи расту са повећањем њиховог размака, што је последица истовременог повећања оптерећења, због смањења укупног броја рожњача утрошак оба материјала по m² основе хале се смањује за све разматране облике попречног пресека. Ипак, евидентно је знатно брже смањење утрошка материјала са повећањем размака код T1 и T2 пресека. Иако се у овој анализи најбоље показао правоугаони попречни пресек, који је истовремено и најједноставнији за извођење и има најмањи утрошак попречне арматуре, за очекивати је да за распоне и размаке рожњача веће од овде анализираних, поготово у комбинацији са тежим кровним покривачима, предност преузму T пресеци, нарочито они облика T2. Уштеда у материјалу услед смањења површине бетона у затегнутој зони пресека, која се постиже преласком са правоугаоног на T пресек, може да дође до изражаја тек код већих оптерећења.

- [7] SRPS EN 1992-1-1 Еврокод 2 - Пројектовање бетонских конструкција - Део 1-1: Општа правила и правила за зграде, Институт за стандардизацију Србије, **2015**.
- [8] SRPS EN 1992-1-1/NA Еврокод 2 - Пројектовање бетонских конструкција - Део 1-1: Општа правила и правила за зграде - Национални прилог, Институт за стандардизацију Србије, **2015**.