

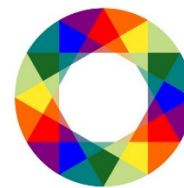
**ДГКМ**  
ДРУШТВО НА  
ГРАДЕЖНИТЕ  
КОНСТРУКТОРИ НА  
МАКЕДОНИЈА

Партизански одреди 24,  
П.Фах 560, 1001 Скопје  
Северна Македонија

**MASE**  
MACEDONIAN  
ASSOCIATION OF  
STRUCTURAL  
ENGINEERS

Partizanski odredi 24,  
P. Box 560, 1001 Skopje  
North Macedonia

**SS - 10**



mase@gf.ukim.edu.mk

<http://mase.of.ukim.edu.mk>

## АНАЛИЗА НА НОСИВОСТ И СТАБИЛНОСТ КАЈ САЌЕСТИ СПРЕГНАТИ ГРЕДИ ЗА РАЗЛИЧЕН БРОЈ НА СРЕДСТВА ЗА СПРЕГАЊЕ

Стефанија МИКАРОВСКА<sup>1</sup>, Денис ПОПОВСКИ<sup>2</sup>

### АПСТРАКТ

Со помош на софтверскиот пакет SAP 2000 моделирани се една саќеста греда и седум саќести спрегнати греди со различна диспозиција и број на средства за спрегање, каде средствата се моделирани со т.н. „link“ елементи со крутост од 100 [kN/mm] додека бетонската плоча и челичниот пресек се моделирани со shell елементи. Усвоени се еден модел со 52 врски, четири модели со 26 врски и два модели со 15 врски со распоред концентриран преку отвори, преку ребрата и рамномерно по целиот носач. Се воочи дека со зголемувањето на бројот на врски се зголемуваат напрегањата во почетокот и крајот по ивиците на првиот отвор од потпората во споредба со добиените напрегања кај неспрегната греда – за 30 % за греда со 52 врски и 15 % за греда со 15 врски поставени преку отвори, за оптоварување од 39 [kN/m<sup>2</sup>]. Разликата меѓу напрегањата за греди со врски преку отвори и преку ребро изнесува 5 %. Гредите со најмал број на врски и позиција на истите преку отвори даваат најповолно искористен носач со најмали напрегања. Од ова може да се заклучи дека гредите со отвори се поволно да се проектираат како делумно спрегнати носачи, во спротивно треба да се обезбеди полно ребро во близина на отворите или се намалат напрегањата со зголемување на крутоста на долниот дел на саќестиот носач за добивање на оптимално решение. Исто така е направена споредба на локалната стабилност за различен број на врски како и споредба со аналитички решенија. Со самото спрегање и зголемување на бројот на можданици, според нумеричките резултати, се подобрува стабилноста за 20 % за греда со 52 врски и 10 % со 15 врски. Се заклучува дека разликата меѓу нумеричките и аналитичките резултати е голема и се потребни дополнителни експерименти за да се направи преглед и усвојат нови релации.

**Клучни зборови:** Саќести греди; Спрегната греда; Парцијално спрегање; Локална стабилност;

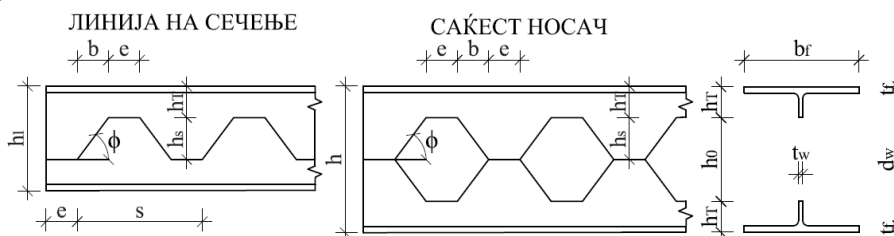
<sup>1</sup> Дипл. град. инж., Градежен инженер во ФАКОМ АД Скопје, Република Северна Македонија, [mikarce.st@gmail.com](mailto:mikarce.st@gmail.com)

<sup>2</sup> Доц. Д-р, Градежен Факултет, Универзитет „Св. Кирил и Методиј“, Скопје, Република Северна Македонија, [popovski@gf.ukim.edu.mk](mailto:popovski@gf.ukim.edu.mk)

## 1. ВОВЕД

Една од главните цели на инженерите е да се оптимизира употребата на материјал и се забрза процесот на изведба, па поради тоа денес се почесто се користат спрегнатите конструктивни системи. Дополнително зголемување на носивоста на крутоста на носачите се добива со сечење по шема (цик-цак) вдолж носачот и се завари така што што се добие повисок носач со отвори во реброто – *саќест носач* (Сл.1). Овој вид на греди се погодни при големи распони каде граничната состојба на употребливост е прва бариера за задоволително однесување. Меѓутоа, покрај придобивките во носивоста и крутоста, отворите предизвикуваат прекин на текот на напрегања по должината на гредата со што се јавува локализација на напрегања околу нив и формирање на дополнителни механизми на лом (Kerdal и Nethercot (1984)). Според ова, покрај основните контроли на свиткување и смолкнување, потребни се дополнителни пресметки:

- контрола на нормални напрегања во „Т“ елементите;
- контрола на вертикални тангенцијални напрегања во олеснетиот дел;
- контрола на хоризонтални тангенцијални напрегања во заварените врски;
- контрола на стабилност при странично-торзионо извивање;
- контрола на локално извивање на реброто;
- контрола на стабилност на притиснат „Т“ елемент;
- контрола на угиб.



Сл.1 Геометрија на саќест носач.

При трансфер на трансверзални сили преку отворите доаѓа до појава на локални секундарни ефекти во „Т“ елементите (Виренделово свиткување) кои значително влијаат на конструктивното однесувањето така што се зголемуваат напрегањата по ивиците на почетокот и крајот на ефективниот отвор ( $l_{eff} = e$ ). При достигнување пластификација на истите настанува т.н. лом при Виренделово свиткување. Со спрегање на горниот „Т“ елемент се јавува дополнителен локален момент ( $M_{vc}$ ) кој ја зголемува носивоста на Виренделово свиткување за  $M_{vc}/l_{eff}$ . Истиот зависи од бројот на средствата за спрегање преку ефективниот отвор, нивната носивост на подигање и должината на отворот. Покрај тоа, композитното влијание ја крева неутралната еластична и пластична оска кон бетонскиот појас со што се намалуваат хоризонталната смолкнувачка сила ( $V_{h,Ed}$ ) и хоризонталниот момент ( $M_{h,Ed}$ ) во најтесниот дел од реброто. Бидејќи настанува при високи трансверзални сили, стабилноста на реброто се подобрува во зависност на односот на распределба на смолкнувачките сили меѓу бетонскиот појас и челичниот носач, како и бројот на средства за спрегање преку реброто. Во целина, заедничката соработка на плочата и гредата позитивно влијае врз механизмите на лом и истата главно зависи од бројот и положбата на средствата за спрегање.

И покрај солидниот број на истражувања за спрегнати греди, не е обрнато внимание да распределбата на напрегања околу отворите при различен број и конфигурација на средствата за спрегање. Последни нови истражувања кои дават осврт на бројот на средства се однесуваат на минималниот степен на спрегање. Sheehan et al. (2016) [7] споведоа експеримент на два асиметрични спрегнати греди со кружни отвори и без времени потпори. Ова истражување е поттикнато со строгиот критериум на задоволување на минималниот степен на спрегање кај асиметрични спрегнати пресеци со полно ребро. Минималниот степен на спрегање е добиен 36 %, скоро половина помалку од пресметаниот според EN1994-1-1. Aggelopoulos et al. (2018) [1] исто така го донесоа истиот заклучок и во нивниот труд предлагат нови релации за пресметување на минималниот степен на спрегање. Европската Комисија приложи работен документ [2] (Muller et al. (2006)) поткрепен со експериментални и нумерички истражувања каде се земени предвид поголем ранг на геометриски карактеристики на попречниот пресек (асиметрични, витки ребра

итн.) и различна технологија на производство (топловалани, заварени) – за проектирање на спрегнати греди со отвори. Покрај генерализиран метод, се изработи и софтвер за пресметување на овој тип на носачи. Бидејќи семи-емпирискиот генерализиран метод за проектирање приложен во прирачникот P100 од Ward (1990) беше калибриран со експериментални резултати само од симетрични неспрегнати греди, Lawson et al. (2006) во својот работен документ [5] презентираа теорија – базирана на условот на рамнотежа и симплифицирани методи, за пресметување на асиметрични спрегнати греди со кружни отвори. Lawson и Hicks (2011) издадоа нов прирачник под SCI публикација P355 [6], кој го заменува прирачникот P068 (Lawson (1987)), работејќи случаеви на спрегнати греди со изолирани правоаголни, кружни и издолжени отвори. Се очекува оваа публикација да е покриена во следната верзија на EN 1994-1-1 [1], [3]. Најново, AISC издаде нов прирачник за пресметување на олеснети спрегнати и неспрегнати греди со кружни отвори и саќести греди, за разлика од претходниот кој беше само за изолирани отвори.

Овој труд дава акцент на дефинирање на разликата на напрегања во линија на горна и долна ивица на отворите – во ниво на максимални и минимални напрегања, за различна конфигурација на средствата за спегање и цели кон дефинирање на однесувањето на системот како и оптимална распределба на средствата за спегање во однос на механизмите на лом. Исто така ќе се направи табеларна споредба на граничните внатрешни големини со добиените резултати од аналитичките пресметки, како и влијанието на спегањето врз локалната стабилност.

## 2. НУМЕРИЧКА АНАЛИЗА

Моделирани се саќести спрегнати греди со помош на конечни елементи во комерцијалниот софтверски пакет SAP2000. За ист распон од 10 [m] направени се повеќе математички модели со иста геометрија и број на отвори, но разлен број и позиција на средства за спегање. Ќе се разгледуваат само греди со симетрично поставени отвори. Запазени се граничните вредности на отворите кои се препорачани од различни автори каде истите се добиени преку параметарски анализи за усогласување на механизмите на лом. Целта е да се моделират 7 модели со различна диспозиција на средствата за спегање по должина на гредата за да се определи распределбата на напрегања во саќестата греда и влијанието на положбата на средствата за спегање преку отворите врз механизмите на лом, како и еден неспрегнат модел за компарација на резултатите.

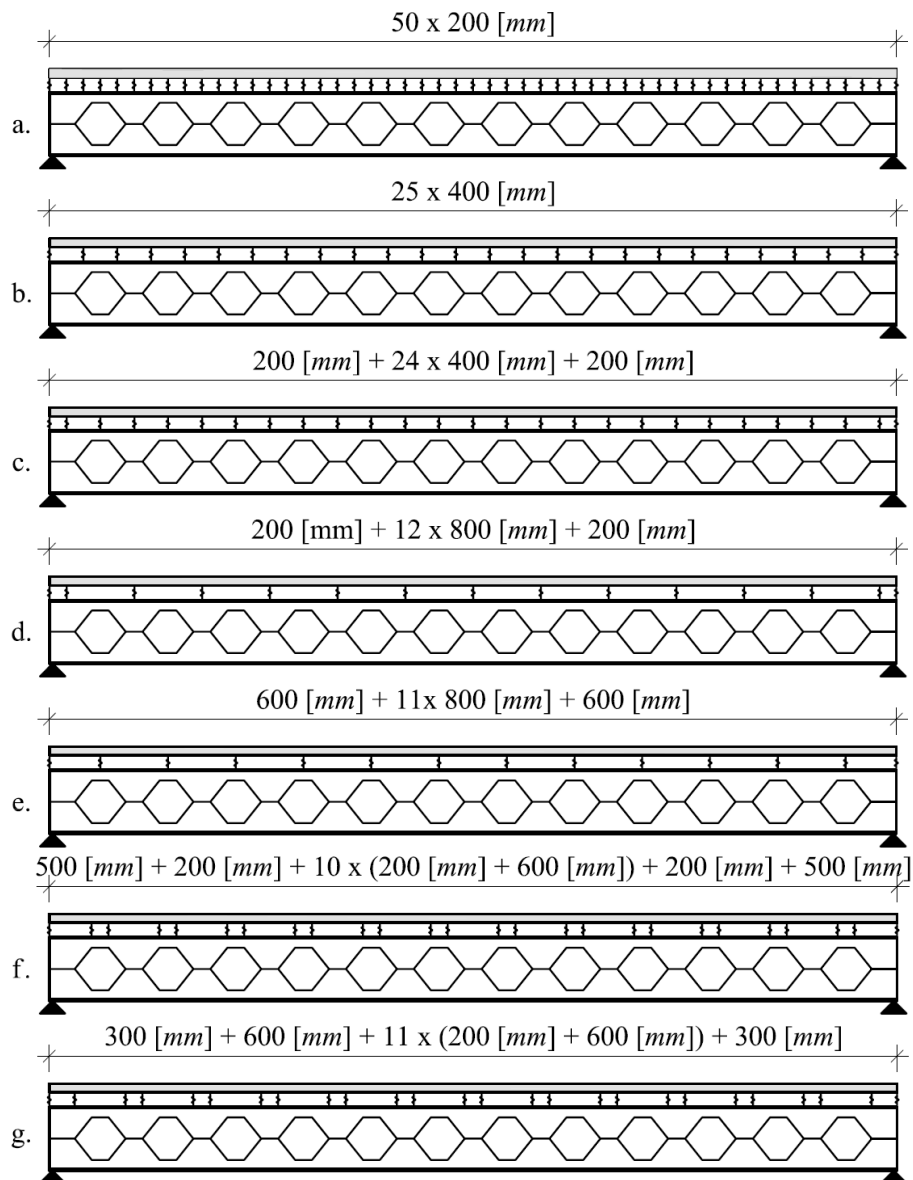
### 2.1. Општо за математичкиот модел

За основен носач усвоен е профил IPE550 при што се изведува шема на сечење за да се добие греда со вкупна висина ( $h$ ) од 750 [mm]. За сите модели (дефинирани се два типа на модели, табела 1.) е усвоена иста висина на гредата и ист распон ( $L$ ) од 10 [m]. Бетонската плоча е со дебелина ( $h_{sl}$ ) од 6.8 [cm] и ширина ( $b_{sl}$ ) 260 [cm] и истата е моделирана на 86 [mm] од горната ивица на гредата. Бетонскиот појас е поставен на повисоко растојание од горниот појас на гредата бидејќи се зема предвид бетонска плоча со профилиран лим со вкупна дебелина од 12 [cm] и висина на профилација ( $h_p$ ) од 52 [mm]. Бидејќи во рачни пресметки ја земаме предвид во носивоста само дебелината над профилираниот лим, во моделот се внесува по ист принцип. Геометриските карактеристики на спрегнатите греди се зададени во табела 1.

Во рачните пресметки се оди со претпоставка дека спрегнатата саќеста греда е потполно спрегната по целата должина, па затоа земаме дека можаниците се со носивост доволна да се пренесат сите влијанијата меѓу двата елементи. Како средства за спегање се усвоени дворедни можаницы со висина 100 [mm], дијаметар ( $d_b$ ) 19 [mm] и меѓусебно растојание во попречен правец од 100 [mm]. Во подолжен правец се усвоени различни конфигурации за сите модели и истите се претставени на сл. 2 за модел 1.

Табела 1. Геометриски карактеристики на саќеста спрегната греда.

	$h$	$b_f$	$t_f$	$t_w$	$h_T$	$a$	$b$	$e=s_0$	$e_1$	$\phi$
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[°]
Модел 1	750	200	16	10.2	250	100	200	200		51.34



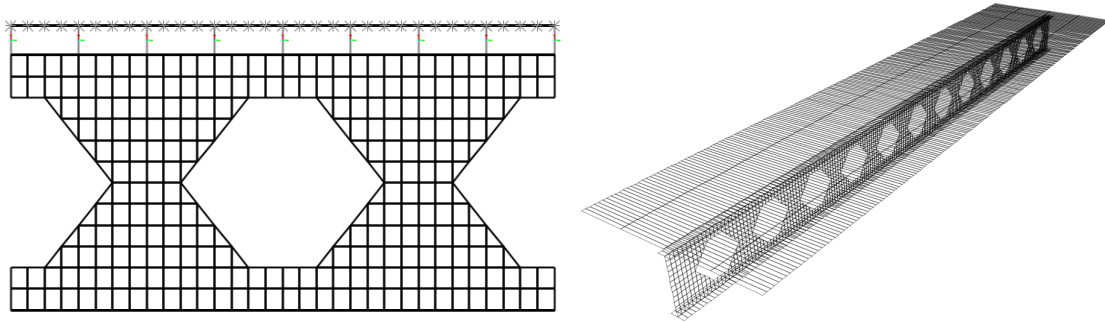
Сл. 2. Различна диспозиција на средства за спрегање (дворедни) за математички модел 1.

## 2.2. Предпроцесирање

Бетонската плоча и челичната греда се моделирана со дводимензионални елементи – „shell“ елементи со димензии  $50 \times 50$  [mm] и  $20 \times 6500$  [mm] соодветно. Бидејќи во интерес ни е однесувањето на саеестата греда, се прави погуста дискретизација на конечните елементи за разлика од бетонската плоча. Поради голема концентрација на напрегања и отворите во реброто, без разлика на односот  $h/L$  на челичниот носач, за реброто на гредата се користат thick shell елементи додека за појасите и бетонската плоча „thin shell“ елементи. Средствата за спрегање - можданици се моделират со т.н. „link“ (врска) елементи преку кои се врши пренос на влијанија меѓу два конструктивни елементи. Моделирани се како линеарно еластична врска кои пренесуваат сили и моменти во сите правци. Во вертикален правец и лонгитудинален правец се задава крутост од  $100$  [kN/mm], додека во попречен правец се фиксира (сл. 3).

Кај неспрегнати модели за задржување на однесувањето на систем проста греда се поставуваат лежишта во крајните јазли кои се во линија на оска на челичниот пресек. На овој начин се симулира реално однесување на чист систем проста греда. За дефинирање проста греда кај спрегната греда, лежишта се поставуваат и по крајните ивици на бетонскиот појас. Исто и во подолжен правец по ивиците на бетонската плоча се задават лежишта во јазлите за ограничување

на транслација само во хоризонтален правец. При анализа на извивање се прават нови гранични услови да сите јазли на краевите од спрегнатите и неспрегнатите носачи се со ограничена транслација во нормален правец, со цел да се овозможи локално извивање на реброто.



Сл. 3. Можданици - „link“ елементи за интеракција меѓу челична греда и бетонска плоча во софтверскиот пакет SAP2000 – приказ на подолжен пресек (сегмент) и 3D поглед.

Спрегнатата саќеста греда се товари со рамномерно распределен товар од  $1.0 \text{ [kN/m}^2\text{]}$  до  $15 \text{ [kN/m}^2\text{]}$ , односно  $2.6 \text{ [kN/m}'\text{]}$  до  $39 \text{ [kN/m}'\text{]}$ . Пресметките за саќеста спрегната греда со диспозиција на можданици според модел 1 а), за товар од  $15 \text{ [kN/m}^2\text{]}$  се добива искористеност на „Т“ елементите на аксијална и трансверзална сила приближно  $70 \text{ [%]}$ , каде со методот на стап за контрола на извивање на реброто меѓу отвори искористеноста е достигната до  $100 \text{ [%]}$ . Меѓутоа, пресметките на Аглан и Редвуд (1974) [7] и Wang (2016) [9] даваат помала искористеност на реброто –  $58 \text{ [%]}$  и  $66 \text{ [%]}$  соодветно. Според овие методи, се предвидува максималниот капацитет на извивање се достигни при товар од  $24 \text{ [kN/m}^2\text{]}$  и  $23 \text{ [kN/m}^2\text{]}$  соодветно. Покрај рамномерно распределен товар, се прави товарен случај од концентриран товар над реброто меѓу 2 и 3 отвор од  $100 \text{ [kN]}$ , односно на растојание од  $1.8 \text{ [m]}$  од потпора.

За саќестата челична греда устоен е квалитет S235 - изотропен материјал со граница на развлекување ( $f_y$ ) од  $235 \text{ [MPa]}$ , граница на кинење ( $f_u$ )  $360 \text{ [MPa]}$ , модул на еластичност ( $E_a$ )  $2.1 \times 10^5 \text{ [MPa]}$  и поасонов коефициент ( $\nu$ )  $0.3$ . За нелинеарна анализа се зема  $\sigma - \epsilon$  крива дефинирана според Еврокод и истиот е прикажан во сл. 4 во софтверскиот пакет SAP2000. Очекувана граница на развлекување ( $f_{ya}$ ) и граница на кинење ( $f_{ua}$ ) е  $258.5 \text{ [MPa]}$  и  $396 \text{ [MPa]}$ . Класа C30/37 на бетон се користи за бетонската плоча со јакост на притисок ( $f_c$ ) од  $30 \text{ [MPa]}$ , модул на еластичност ( $E_c$ )  $3.3 \times 10^4 \text{ [MPa]}$  и поасонов коефициент ( $\nu_c$ )  $0.2$ .  $\sigma - \epsilon$  кривата е прикажана во сл. 4.

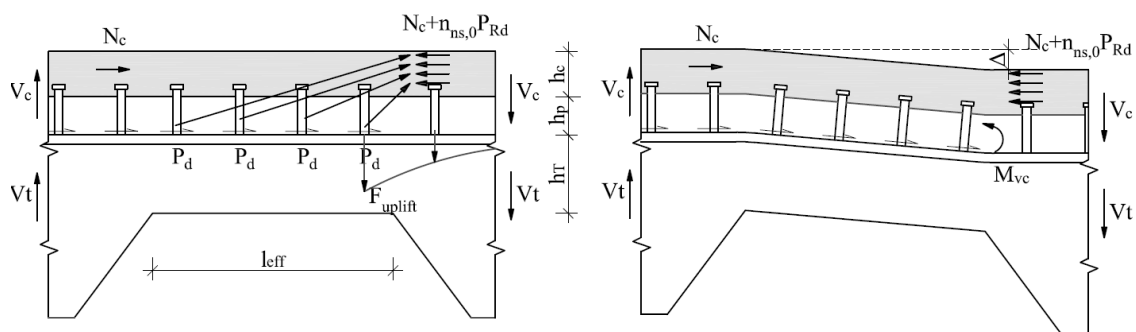
### 2.3. Процесирање

Извршени се два типа на анализи: (1) нелинеарна статичка анализа со геометриска нелинеарност (P- $\Delta$ ); (2) анализа на извивање. Нелинеарна анализа со геометриска нелинеарност сила – поместување се користи бидејќи се очекуват концентрации на напрегања околу отворите и поради земање предвид дополнителните моменти во „link“ елементите при пренос на сили при деформирање на носачот. Со ова се симулира Виренделово свиткување, сл. 4. Нелинеарната статичка анализа се изведува со Њутн-Рапсон метод со 40 итерации за секој чекор и толеранција на конвергенција од  $1 \times 10^{-6}$  – оставени се предодредените параметри од самиот софтвер. Анализа на извивање се изведува за нелинеарни товарни случаи со толеранција за конвергенција од  $1 \times 10^{-9}$  за 6 форми на извивање.

### 2.4. Постпроцесирање

При анализа на извивање, софтверскиот пакет SAP2000 дава фактор на стабилност кој претставува колку пати треба да се зголеми оптоварувањето за да се изгуби стабилноста. Во следната табела 2 се зададени граничните оптоварувања и внатрешни статички големини ( $M$ ,  $V$ ) при кои се манифестира локално извивање на реброто. За неспрегната саќеста греда со регуларни (модел 1) се приложени податоци за гранично оптоварување при локална нестабилност за втора тонова форма бидејќи во прва се јавува странично торзионо извивање уште пред локално извивање, додека локално извивање на реброто се јавува во втората тонова форма. За разлика од

неа, спрегнатата греда е странично торзионо крута па локално извивање се јавува при прва тонова форма. Со сл. 5 прикажана е формата на извивање на реброто меѓу првиот и вториот отвор во дијагонална линија паралелна со косите страни на отворот.



Сл. 4. Секундарни ефекти на свиткување – Виренделово свиткување.

Табела 2. Гранично оптоварување и статички големини при губење стабилност на реброто при извивање со двојна кривина.

	n	q [kN/m']	Q <sub>k</sub> [kN]	Модел 1 % [%]	Модел 1 % [%]	V <sub>q</sub> [kN]	M <sub>q</sub> [kNm]	V <sub>Qk</sub> [kN]	M <sub>Qk</sub> [kNm]
модел 1	0	96.26	129.90	100	100	385.06	433.19	106.52	191.73
модел 1.a)	52	115.18	732.32	120	660	460.71	518.30	600.5	1080.9
модел 1.b)	26	106.61	703.20	111	649	426.45	479.75	576.6	1037.92
модел 1.c)	26	109.04	701.6	113	539	436.18	490.70	575.31	1035.56
модел 1.d)	15	105.57	657.64	110	641	422.27	475.05	539.26	970.67
модел 1.e)	15	105.85	679.60	110	523	423.40	476.33	557.28	1003.10
модел 1.f)	26	108.56	681.96	113	525	434.24	488.52	557.21	1006.58
модел 1.g)	26	108.71	713.50	113	549	434.82	489.18	585.07	1053.13

n - број на врски по должина на гредата

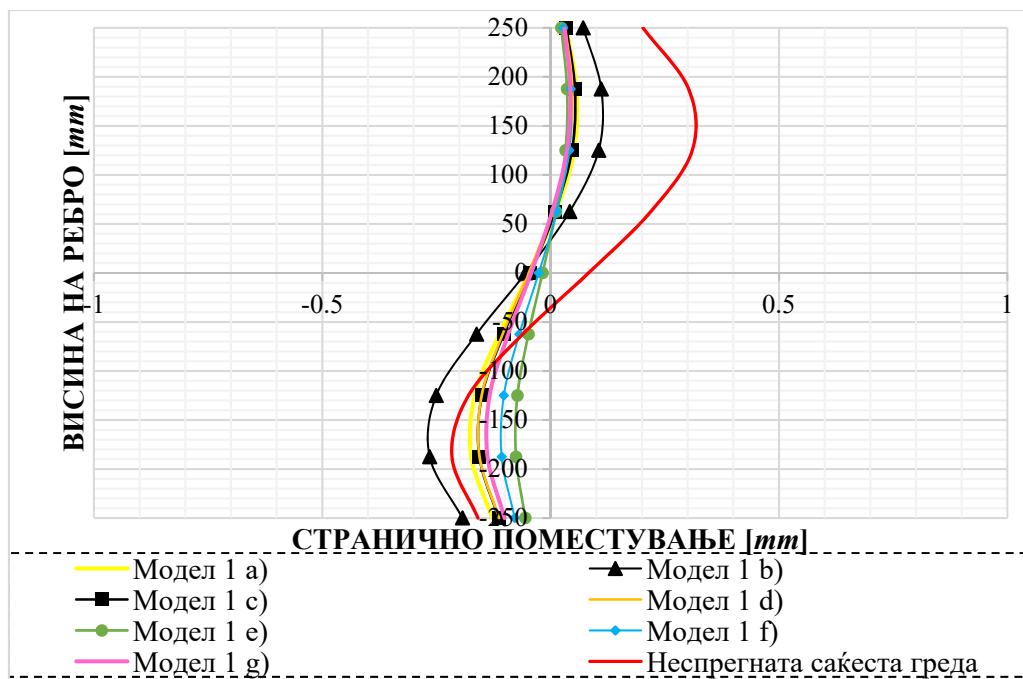
q - рамномерен линиски товар

Q<sub>k</sub> - концентриран товар

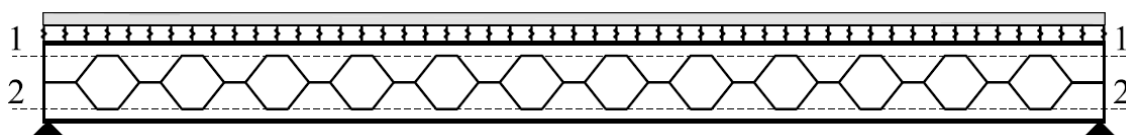
За најрепрезентативен приказ на нормалните напрегања, истите се прикажани во линија на горна и долна ивица на отворите – каде што се јавуваат максималните напрегања: пресек 1-1 и пресек 2-2 (сл. 6). Со сл. 7 прикажани се напрегањата (S11 – нормални напрегања) за усвоени модели со 52 и 15 средства за спрегање, споредено со неспрегнат модел за горен „Т“ елемент, во линија на пресек 1-1, додека со сл. 8 напрегања за долниот „Т“ елемент по пресек 2-2 за сите модели. Покрај приложените графици, дадени се табели (табела 3 и табела 4) за разлика на напрегањата по должина на првиот отвор меѓу спрегнатите модели со неспрегната саќеста греда за нормални (S11) и тангенцијални (S12) напрегања, како и односот меѓу напрегањата во почетокот и крајот на отворот. Разликата во напрегањата е прикажано процентуално за позиција меѓу почетокот и крајот на горниот „Т“ елемент на последниот отвор за модел 1, а негативните вредности претставуваат пораст а позитивните пад на напрегањето.

### 3. ДИСКУСИЈА НА РЕЗУЛТАТИ И ЗАКЛУЧОК

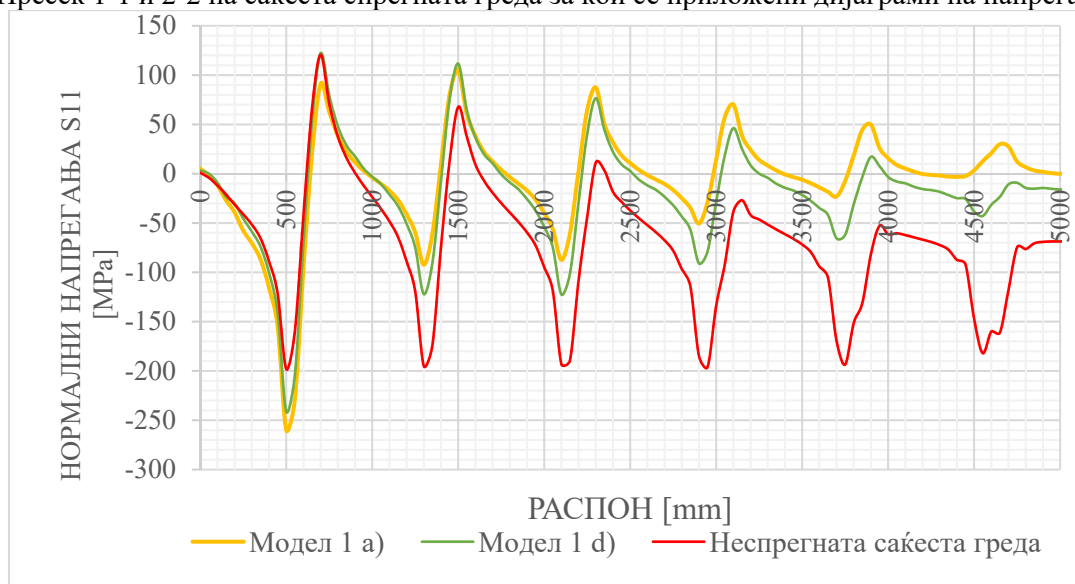
Од графичите зададени претходно може да забележи поволното влијание на спрегањето, како и негативните аспекти. Во последниот „Т“ елемент на крајот на горниот „Т“ елемент поблиску до потпората се зголемуваат значително напрегањата - околу 60[MPa] за модел 1 а) со најголем број на врски. Со оглед на поголемата разлика на напрегања во горниот „Т“ елемент, табела 3 се однесува само за горен „Т“ елемент.



Сл. 5. Локално извивање на ребро меѓу отвори 1 и 2 при рамномерен товар од  $39 [kN/m]$



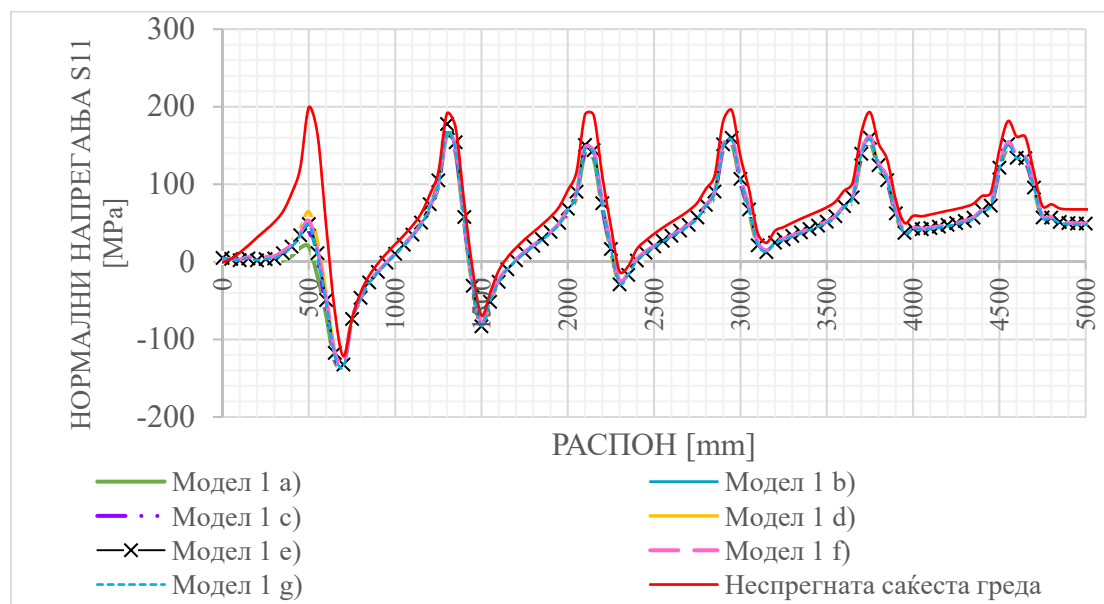
Сл. 6. Пресек 1-1 и 2-2 на саќеста спрегната греда за кои се приложени дијаграми на напрегања.



Сл. 7. Нормални напрегања на горен „Т“ елемент по линија на пресек 1-1 за половина распон и оптоварување од  $15 [kN/m^2]$ , модели со 52 и 15 број на врски.

Во спротивно на спрегната греда со полно ребро, саќестите носачи имаат поповолно однесување при побал број на средства на спрегање. Според табела 3. може да се забележи дека најмал пораст на напрегањата има за модел 1 d) со 15 врски. И покрај тоа што поголемиот број на врски ги намалуваат напрегањата по должина на носачот ближејќи се кон нулта вредност, меродавен пресек за димензионирање е попречниот пресек во последниот отвор. Затоа и се стреми гредите со отвори да се изведуваат така што во зона околу потпорите се постават појачувања – образни

лимови над крајните отвори, или оставање на подолго полно ребро. Покрај тоа, исто може да се забележи дека најповолна позиција на средствата за спрегање е преку отвори при што овозможуваат помал пораст на напрегањата, со разлика во просек од 5 %.



Сл. 8. Нормални напрегања на долен „Т“ елемент по линија на пресек 2-2 за половина распон и оптоварување од 15 [kN/m²].

Во спротивно на горниот „Т“ елемент, во долниот значително се намалуваат напрегањата по ивиците на отворот – дури за 140 [MPa] за модел 1 a). Според овие податоци може да се забележи дека најдобро искористување на пресекот ќе имаме ако наместо симетричен сајест носач, истиот се изведи од два различни топовалани профили каде за долниот дел ќе се постави основен исечен профил со поголема носивост за разлика од горниот. На овој начин, долниот „Т“ елемент ќе вовлечи поголеми напрегања со што ќе се намалат истите во горниот „Т“ елемент. За да се потврди оваа претпоставка, зголемено е долното ребро и појасот до 18 [mm] дебелина за добивање на поголема асиметрија при што максималното напрегање во горниот „Т“ елемент се намали за скоро 100 [MPa].

Од севкупните добиени резултати и изработените графици може да се заклучи дека спрегнатите сајести греди се најдобро искористени ако се изведат како делумно спрегнати. Во спротивно, ако се изведуваат со целосно спрегање треба да се стреми кон усвојување на асиметричен челичен пресек. Поради големите тангенцијални напрегања, при пренос на силите на триење меѓу бетонската плоча и челичниот пресек преку средствата за спрегање, се јавуваат многу поголеми концентрации на напрегања на краевите со што може да резултира до предимензиониран пресек по целата должина. Треба да се напомени дека кај сите модели имаме целосно спрегање, бидејќи без разлика на оптоварувањето, врските ќе ги пренесат сите влијанија во челичниот пресек.

Табела 3. Разлика во нормални (S11) и тангенцијални (S12) напрегања меѓу неспрегната (модел 1) и спрегната сајеста греда (модел 1: a-g) за горен „Т“ елемент.

$l_e$ , [mm]	500*	550	600	650	700*
	%	S11			
модел 1 a)	-31.10	-43.01	-126.93	69.89	24.56
модел 1 b)	-30.71	-42.80	-121.53	57.71	15.88
модел 1 c)	-25.38	-34.68	-98.73	53.36	17.82
модел 1 d)	-21.64	-27.58	-65.17	19.62	-1.28
модел 1 e)	-14.20	-20.26	-60.50	33.50	11.46
модел 1 f)	-26.25	-36.32	-117.11	78.72	28.92
модел 1 g)	-32.26	-43.30	-115.77	50.87	10.49



	%	S12			
модел 1 а)	-18.18	-12.61	-15.79	1.00	-7.76
модел 1 б)	-30.71	-42.80	-121.53	57.71	15.88
модел 1 в)	-19.29	-9.57	-13.92	1.81	-11.14
модел 1 д)	-11.83	-14.92	-13.51	-12.71	-15.45
модел 1 е)	-12.49	-3.00	-7.62	3.76	-12.41
модел 1 ф)	-17.64	-12.44	-8.96	10.49	0.17
модел 1 г)	-16.13	-18.51	-15.34	-13.01	-14.13

Табела 4. Однос на нормални ( $S11^1/S11^2$ ) и тангенцијални ( $S12^1/S12^2$ ) напрегања на почеток и крај на отвор на горен „Т“ елемент и однос на напрегања меѓу горен и долен „Т“ елемент ( $S11^{dolu}/S11^{gore}$ ) за почеток и крај на отвор.

	$S11^1/S11^2$	$S12^1/S12^2$	$S11^{gore}/S11^{dolu}$	
	%			
			1	2
модел 1	-1.64	1.22	-0.99	-0.75
модел 1 а)	-2.85	1.33	-13.24	-0.67
модел 1 б)	-2.55	1.23	-6.15	-0.76
модел 1 в)	-2.50	1.31	-6.32	-0.73
модел 1 д)	-1.97	1.18	-3.74	-0.91
модел 1 е)	-2.12	1.22	-4.64	-0.81
модел 1 ф)	-2.92	1.43	-4.73	-0.64
модел 1 г)	-2.43	1.24	-5.54	-0.79

Табела 5. Гранично оптоварување и статички големини при губење стабилност.

	$V_q$ [kN]	$V_{bc(AR74)}$ [kN]	$V_{bc(Wang)}$ %	$V_{bc(Wang)}$ [kN]	$V_{t(bc)}$ %	$V_{t(bc)}$ [kN]	$V_{b(bc)}$ [kN]	$V_{Rd,shear}$ %	$V_{Rd,shear}$ [kN]	$V_{Rd,Vieren.}$ [kN]	$V_{Rd,Mh}$ [kN]	$V_{Rd,Vh}$ [kN]
1	385.06	315.15	18.2	242.89	36.9	257.953	1061.57	33.0	398.08	368.4	393.45	242.89
1.a)	460.71	318.59	30.8	242.89	47.3	296.53	981.42	35.6	415.88	422.81	454.86	304.31
1.b)	426.45	318.59	25.3	242.89	43.0	296.53	981.42	30.5	415.88	376.54	418.01	267.46
1.c)	436.18	318.59	27.0	242.89	44.3	296.53	981.42	32.0	415.88	412.82	430.29	279.75
1.d)	422.27	318.59	24.6	242.89	42.5	296.53	981.42	29.8	415.88	376.54	405.72	255.18
1.e)	423.40	318.59	24.8	242.89	42.6	296.53	981.42	30.0	415.88	423.43	418.01	267.46
1.f)	434.24	318.59	26.6	242.89	44.1	296.53	981.42	31.7	415.88	450.84	418.01	267.46
1.g)	434.82	318.59	26.7	242.89	44.1	296.53	981.42	31.8	415.88	376.54	418.01	267.46

$V_q$  - носивост пред локално извивање при смолкнување според нумерички модел

$V_{bc(AR74)}$  - носивост пред локално извивање при смолкнување според Аглан и Редвуд (1974)

$V_{bv(Wang)}$  - носивост пред локално извивање при смолкнување според Wang (2016) [8]

$V_{t(b),bc}$  - носивост пред локално извивање при смолкнување според методот на стаб (strut model)

$V_{Rd,shear}$  - носивост на чисто смолкнување

$V_{Rd,Vieren.}$  - носивост на смолкнување раководено од Виренделово свиткување

$V_{Rd,Vh(Mh)}$  - носивост на смолкнување раководено од хоризонтално смолкнување и свиткување на ребро

Најголем придонес врз локалната стабилност на реброто има модел 1 а) со 52 врски, каде носивоста се зголемува скоро 20 [%], додека со 26 број на врски се добива просечно 12 [%] и со 15 врски 10 [%]. Конфигурацијата на врските скоро и не влијае врз стабилноста, но сепак најповолна положба е поставување на истите преку отвори. Подобрувањето на локалната стабилност може да се види и според сл. 5, каде се забележува дека неспрегатата саќеста греда има поголема должина на извивање, односно превојната точка е за 60 [mm] вертикално подолу

(должината на извивање е подолга за 77 [mm] поголема), додека кај спрегнатите модели истата е во средината.

Покрај граничен линиски товар направена е и контрола на концентриран товар. Зачудувачки е тоа што се добива носивост која е во просек 15 [%] поголема од стабилноста при рамномерен товар. Пресметаната трансверзална сила е аналитички добиена, но во нумеричкиот модел спрегањето овозможува порамномерна распределба по носачот, со што реалната трансверзална сила која се прима во второто ребро под концентрираниот товар во моделот не е со толкав интензитет. За разлика од нив, несспрегнатиот модел дава поточни резултати и истото се потврдува со тоа што стабилноста се губи порано за разлика од рамномерно оптоварување. Тоа е и логички бидејќи саќестите греди товарени со концентриран товар над ребро имаат тенденција да ја изгубат стабилноста при странично извивање со една кривина.

Приложена е дополнителна табела 5 каде, покрај резултатите од нумеричките истражувања, се зададени и аналитички решенија со цел да се споредат недоследностите. Иако кај греди со големи распони и при рамномерно распределен товар не е меродавна локалната стабилност, сепак треба да се посочи дека аналитичките изрази даваат конзервативни резултати и се потребни дополнителни експериментални и нумерички истражувања за да се формулираат точни релации.

### 3.1. Заклучок

Од добиените резултати може да се заклучи:

- со зголемување на бројот на средства за спрегање се зголемуваат нормалните напрегања во горниот „Т“ елемент во ивицата поблиску до потпора, додека во спротивно во долниот „Т“ елемент се намалуваат;
- со поставување на средствата за спрегање преку отвори се добива за 5 % поголема носивост за разлика од поставени средства преку ребра;
- според нивото на напрегања по ивиците на отворот, симетричните спрегнати саќести греди подобро се однесуваат при делумно спрегање;
- со зголемување на бројот на средства за спрегање се подобрува локалната стабилност на извивање на реброто;
- аналитичките релации за дефинирање на локалната стабилност на извивање на реброто се крајно конзервативни и се потребни нови изрази поткрепени со експеримент.

### Литература

- [1] Aggelopoulos, E.S., Hanus, F., Lawson, R.M. (2018). Shear connection requirements for composite cellular beams. Proc. Of 12<sup>th</sup> International Conference on Advances in Steel-Concrete Composite Structures (ASCCS 2018), Valencia, Spain, pp. 153-159.
- [2] Directorate-General for Research and Innovation (European Commission), (2006). Large web openings for service integration in composite floors. paper, 14 December 2006.
- [3] European Committee for Standardization, Standard, 2004/1994-1-1/EN, December 2004, Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings.
- [4] Gizejowski, M.A., Salah, W.A. (2011). Numerical modeling of composite castellated beams. Prop. of International Conference on Composite Construction in Steel and Concrete
- [5] Lawson, R.M. et al. (2006). Design of composite asymmetric cellular beams and beams with large web openings. Proc. Of Journal of Constructional Steel Research 62, pp. 614-629.
- [6] Lawson, R.M., Hicks, S.J. (2011). Design of composite beams with large web openings. SCI P355, SCI, Silwood Park, Ascot, Berkshire, SL5 1QN, UK.
- [7] Sheehan, T. et al. (2015). Experimental study on long spanning composite cellular beam under flexure and shear. Journal of Constructional Steel Research, Vol. 116, pp. 40 – 54.
- [8] Wang, P. et al. (2016). Shear buckling strengths of web-posts in a castellated steel beam with hexagonal web openings. Proc. of Journal of Constructional Steel Research 121, pp.173-184.