

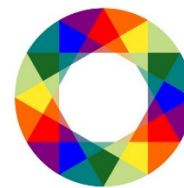
**ДГКМ**  
ДРУШТВО НА  
ГРАДЕЖНИТЕ  
КОНСТРУКТОРИ НА  
МАКЕДОНИЈА

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 - 12**



mase@gf.ukim.edu.mk  
http://mase.gf.ukim.edu.mk

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО И АНАЛИТИЧКО ОПРЕДЕЛУВАЊЕ НА РОТАЦИОНАТА КРУТОСТ КАЈ “Т” ЈАЗЛИ

Миле ПАРТИКОВ<sup>1</sup>, Петар ЦВЕТАНОВСКИ<sup>2</sup>

### АПСТРАКТ

Во овој труд дадена е една поопсежна и комплексна анализа на незајакнати Т-јазли изведени од затворени кутијаста профили. Со цел да се определи ротационата крутост на Т-јазлите и влијанието на геометриските карактеристики на јазелот, вклучувајќи го односот ширина-дебелина на појасот, соодносот на ширината на исполната со ширината на појасот, извршена е компаративна анализа на однесувањето на реални моделски испитувања и математички 3Д модели. Математичките модели се изработени со тродимензионални (BRIC) конечни елементи во софтверскиот пакет SOFISTIK зададени со осум точки во просторот. Јазелот е анализиран со статичка нелинеарна анализа. Користена е само материјалната нелинеарност бидејќи беше утврдено дека геометриската нелинеарност нема големо влијание на добиените резултати туку само го зголемува времетраењето на анализата за околу 10 пати. Користен е билинеарен материјален модел со оцврснинење E/100 согласно препораките на Еврокод 3 Дел 1-5 Анекс С.

Резултатите од истражувањето покажуваат дека, кога разликата во димензиите на исполната и појасот се поголеми, ротационата крутост на јазлите опаѓа и тие јазли се однесуваат како полу-крути. Штом димензиите на исполната се приближуваат до димензиите на појасот, ротационата крутост на јазелот се зголемува и тие може да ги задоволат и условите за апсолутно крути јазли.

*Клучни зборови:* Вирендел; Невкрутен, Јазел; Крутост;

<sup>1</sup> асист. м-р Миле Партиков, Градежен факултет, Универзитет “Св. Кирил и Методиј”, Скопје, Република Северна Македонија, [partikov@gf.ukim.edu.mk](mailto:partikov@gf.ukim.edu.mk)

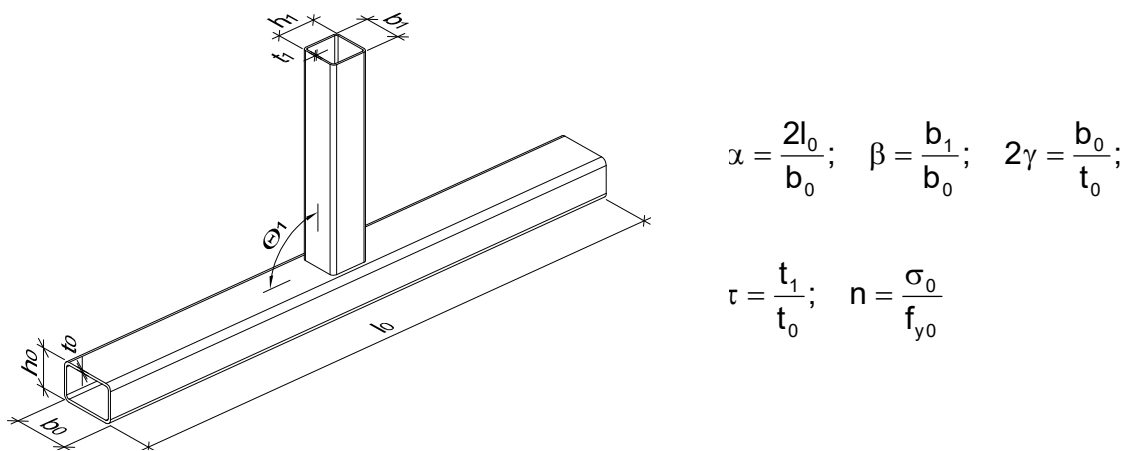
<sup>2</sup> Проф. д-р Петар Цветановски, Градежен факултет, Универзитет “Св. Кирил и Методиј”, Скопје, Република Северна Македонија, [cvetanovski@gf.ukim.edu.mk](mailto:cvetanovski@gf.ukim.edu.mk)

## 1. ВОВЕД

Вирендел носач за прв пат бил предложен од Arthur Vierendeel во 1896 година. Овој носач е составен од појаси (Chord members) и исполна (Brace members) составена од елементи кои скоро секогаш се под агол од  $90^{\circ}$  во однос на појасите.

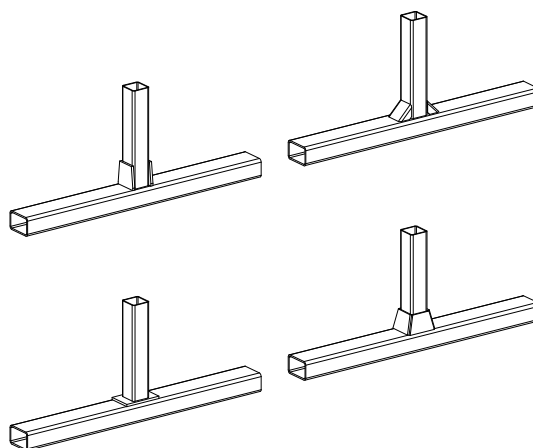
Стандардната процедура за пресметување на вирендел носачи се состои во тоа да јазлите се претпоставуваат како апсолутно крути, што пак кај носачи составени од квадратни (SHS) и правоаголни (RHS) профили е доста редок случај. Кај класичните решеткасти носачи (составени од вертикална и дијагонална исполна) при гранична состојба на носивост јазлите се однесуваат речиси зглобно и во исполната се јавуваат само аксијални сили на притисок или затегање. Јазлите од вирендел носачите можат да бидат крути или полукрути, а во елементите од исполната се јавува значителен момент на свиткување како и аксијални и трансверзални сили.

Основен тип на јазел кај овие носачи претставува т.н „Т – јазел” натоварен доминантно со момент на свиткување во рамнината на јазелот. Основните димензии и параметри на „Т – јазелот” се дадени на Сл.1.



Сл. 1. Параметри на „Т – јазел” (незајакнат)

Досегашните истражувања на однесувањето на јазлите од вирендел носачите биле концентрирани на незајакнати (Сл.1) и зајакнати (Сл.2) изолирани јазли натоварени со хоризонтална сила преку вертикалата при што се определувала носивоста на јазелот како и зависноста момент – ротација.



Сл. 2. Типови на зајакнати јазли кај вирендел носачи

Рамнински јазли составени од квадратни (SHS) и правоаголни (RHS) профили, товарени со момент на свиткување во рамнина на јазелот, истражувани се од Duff (1963), Redwood (1965), Cote et al. (1968), Mehrotra и Redwood (1970), Lazar и Fang (1971), Wardenier (1972), Mehrotra и

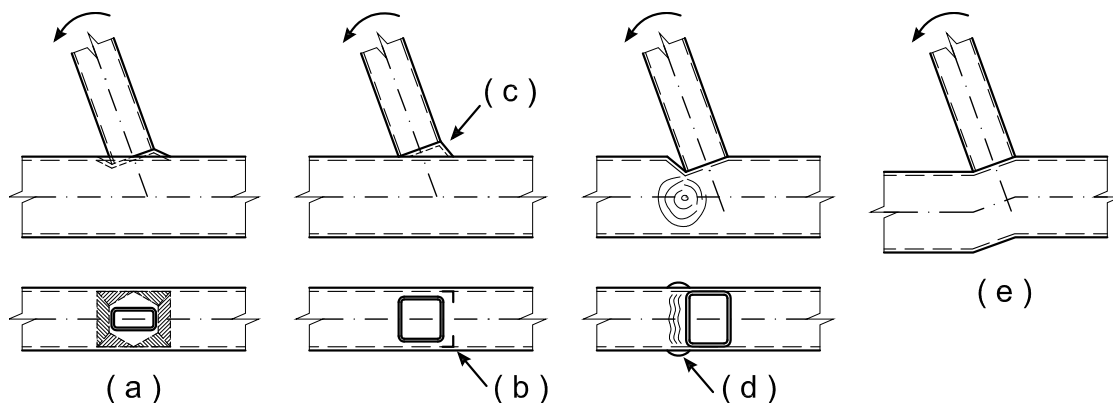
Govil (1972), Staples и Harrison, Brockenbough (1972), Korol et al. (1977), Korol и Mansour (1979), Kanatani et al. (1980), Korol et al. (1982), Korol и Mirza (1982), Mang et al. (1983), Davies и Panjeh Shahi (1984), Szlendak и Brodka (1985, 1986a, 1986b), Szlendak (1986,1991), Kanatani et al. (1986), и Yeomans и Giddings (1988).

Општ заклучок од досегашните истражувања на неврктени изолирани јазли е дека носивоста и крутоста на јазлите се намалува со:

- зголемување на соодносот ширина-дебелина ( $2\gamma=b_0/t_0$ ) на појасот
- намалување на соодносот на ширините на појас-исполна ( $\beta=b_1/b_0$ )

Еврокод 3 Дел 1-8 [1] не дава критериум за класификација на овие јазли. Вирендел носачите може да се разгледуваат како моментни рамовски системи, но класификацијата на јазлите, согласно Еврокод 3 за рамовски системи е неприменлива што е покажано со истражувањето на Wang и Chen (2005) [2].

Korol et al. (1977) [3] дава предлог емпириска формула за прогнозирање на максималниот носив момент на јазелот, но овој момент јазелот го постигнува за сметка на преголеми деформации во иститот. Поради ова, во пракса, моментниот капацитет на овие јазли може да се определи на начин сличен како кај „Т – јазли“ товарени со аксијална сила, и тоа преку граничен капацитет на контактот помеѓу појасот и исполната, или преку деформационен/ротационен капацитет предложен од Wardenier (1982) [4]. Овој пристап на пресметување е применлив ако се зема во предвид еден од можните модели на лом за ваков тип на јазли, прикажани на Сл.3.



Сл. 3. Карактеристични типови на лом кај јазли од SHS и RHS профили натоварени со момент на свиткување (Wardenier, 1982)

- a) пластифицирање на сидот од појасот
- b) лом во појасот преку пробивање
- c) лом во исполната
- d) извивање (губење на стабилност) на страничните сидови на појасот
- e) смолкнување на појасот

Носивоста на јазлите кај вирендел носачите треба да се редуцира за сметка на постоењето на аксијална сила во исполната.

При гранична носивост, аголните завари во зоната на јазелот треба да имаат доволен носив и ротационен капацитет за да ја следат деформацијата на јазелот, како и да обезбедат прераспределба на влијанијата. Дебелината (a) на аголните завари во зоната на јазелот треба да ги исполнуваат условите кои важат и за аксијално товарени јазли и истата е директно зависна од дебелината на сидот (t) на профилот кој се заварува како и од квалитетот на материјалот. Согласно факторот на корелација кој зависи од квалитетот на материјалот даден во табела 4.1 од Еврокод 3 Дел 1-8, при изведување на заварите кај јазлите од цевкасти профили се препорачува минимална дебелина  $a \geq 0.92t$  за S235 па се до  $a \geq 1.48t$  за S460.

Ефективноста на аголните завари директно зависи од параметрите  $2\gamma$  и  $\tau$ . За да биде целиот завар вклучен во носивоста потребно е што е можно помали вредности на овие параметри.

Јазлите од квадратни (SHS) и правоаголни (RHS) профили кои имаат соодноси  $\beta < 0.85$  и  $b_o/t_o > 16$  се однесуваат како полукрути, и речиси секогаш носивоста е дефинирана преку пластификација на сидот од појасот за кој е поврзана исполната. „Т – јазлите“ кои имаат моментна носивост еднаква на моментниот капацитет на елементот од исполната, може да се сметаат за јазли со полна крутост (крут јазел). Анализата на рамовски систем (каков што е вирендел носачот) со полукрути јазли треба да се спроведе со земање во предвид на карактеристиката сила-поместување (момент-ротација) на јазлите. Оваа карактеристика на јазлите може да се добие со анализа на јазлите со конечни површински или волуменски елементи, со лабораториски испитувања или да се користат резултати од досегашни испитувања [5].

## 2. ПРЕДМЕТ И ЦЕЛИ НА ИСТРАЖУВАЊЕТО

Со претпоставување на однесувањето на јазлите како идеално зглобни или крути се врши значително поедноставување на процедурата за пресметување. Полукрутите јазли кај вирендел носачите имаат значително влијание во распределбата на нормалните напрегања, зголемени деформации, критичните товари на извивање и сопствените фреквенции.

Предмет на истражување во овој труд ќе бидат ефектите од геометриските карактеристики на незајакнати „Т-јазли“ врз ротационата крутост. За потребите на ова истражување соодносот ширина-дебелина  $2\gamma = b_o/t_o$  се менува и е усвоен да биде 20, 25 и 33.3 а соодносот на ширините на појасот и исполната  $\beta = b_1/b_o$  изнесува 0.4, 0.5, 0.6 и 0.7.

Цел на истражувањето е да преку реални модели во вистинска големина експериментално се добијат крутостните карактеристики (момент-ротација) на овие јазли и истите се искористат за „баждарење“ на 3Д аналитички модели изработени во софтверскиот пакет SOFISTIK.

## 3. МОДЕЛИ ЗА АНАЛИЗА

Најточен метод за моделирање на јазлите е со тродимензионални модели со конечни елементи. На овој начин, влијанието на геометријата на јазелот директно се зема во предвид.

За потребите на ова истражување, како што беше погоре споменато, изработен е параметарски модел во софтверскиот пакет SOFISTIK преку неговиот модул за внесување на податоци TEDDY. Користени се тродимензионални „BRIC“ конечни елементи дефинирани со осум точки во просторот. Појасот на јазелот (SHS100x3,4,5) е со висина од 1000mm и истиот е поделен на три дела. Средниот дел, каде што е врквата со исполната е со висина од 200mm и е моделиран со погуста мрежа на конечни елементи чија што димензија не надминува 5x5mm, радиусот на појасот е поделен шест еднакви делови а дебелината на појасот е поделена на два дела за вредности на  $2\gamma = 25$  и 33,3 а дебелината на појасот со  $2\gamma = 20$  е поделена на три дела (Сл.4). Горниот и долниот дел од појасот во висина од по 400mm каде што нема никакви ефекти од моментот нанесен на контактот и со цел да се намали времето потребно за решавање на моделот е моделиран со „погруба“ мрежа на конечни елементи чија што димензија не надминува 10x10mm додека радиусите на појасот се исти како и во центалниот дел (Сл.4).

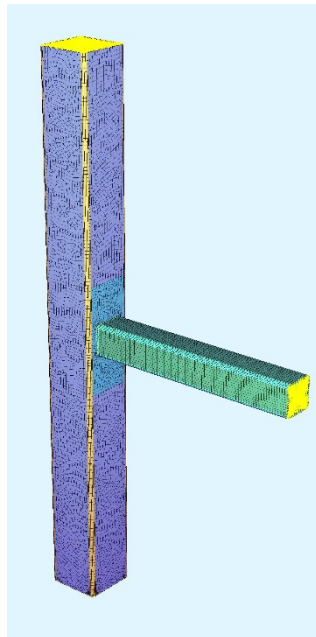
Вертикалите во моделот (40x40,50x50, 60x60 и 70x70) се со должина од 400mm и истите се моделирани со димензии на конечните елементи исти како и средниот дел на појасот а радиусите се исто така поделени на шест еднакви делови. Целата висина на вертикалата е „екструдирана“ со висина на конечните елементи не поголеми од 5mm а дебелината на цевката е поделена исто како и појасот (Сл.4). Во моделот е моделиран и аголниот завар чија што дебелина е земена како средна вредност од измерените дебелини на реалните модели.

Потпирањето е моделирано така што сите точки на појасот се поврзани со тежиштето на попречниот пресек со крути елементи и во тежишната точка се поставени неподвижни зглобни лежишта. Должината на појасот (параметар  $\alpha$ ) е така избран да начинот на ослонување не влијае на крутоста на јазелот.



Поради потребите на опремата за нанесување на силата, исполната е изработена со должина од 500mm а силата се нанесува на растојание од 400mm мерено од лицето на појасот.

Во математичкиот модел силата во јазелот се внесува тежиштето на исполната а таа точка е поврзана со со исполната исто така преку крути елементи.



(a)



(b)

Сл. 4. Математички и експериментален модел

За потребите на ова истражување извршено е испитување на материјалните карактеристики за секоја дебелина што е користена при што се добиени испитните карактеристики напрегање-дилатација. При моделирање на материјалот во софтверскиот пакет SOFISTIK потребно е да се изврши трансформација на испитните вредности со цел да се добијат “вистинските“ вредности на дилатацијата и напрегањата согласно Еврокод 3 Дел 1-5 Анекс С (6).

$$\varepsilon_{\text{true}} = \ln(1 + \varepsilon) \quad ; \quad \sigma_{\text{true}} = \sigma(1 + \varepsilon)$$

каде што:

- $\varepsilon_{\text{true}}$  – “вистинска дилатација“
- $\varepsilon$  – номинална (испитана) дилатација
- $\sigma_{\text{true}}$  – “вистинско напрегање“
- $\sigma$  – номинално (испитано) напрегање

Средните делови од кутијастите профили се моделирани со овој материјал додека пак во кошињата, поради ладното обликување доаѓа до зголемување на границата на развлекување и тие зони се моделирани со граница на развлекување согласно формулата дадена во Еврокод 3:

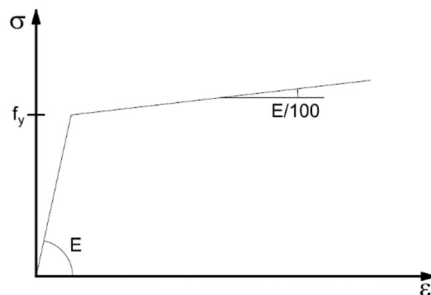
$$f_{ya} = f_y + k * n * \frac{t^2}{A} * (f_u - f_y)$$

каде што:

- $f_y$  - граница на развлекување на основниот материјал (MPa)
- $f_u$  - граница на кинење на основниот материјал (MPa)
- $t$  - дебелина на сидот на профилот (mm)
- $k$  – коефициент кој зависи од начинот на обликување на профилот  
( $k = 7$  за ладнообликувани профили)
- $n$  – број на заоблувања на профилот под агол од  $90^\circ$  со внатрешни радиуси  $< 5t$

Зголемувањето на границата на развлекување во зоните на ладно обликување не смее да биде поголемо од 20% од основната граница на развлекување.

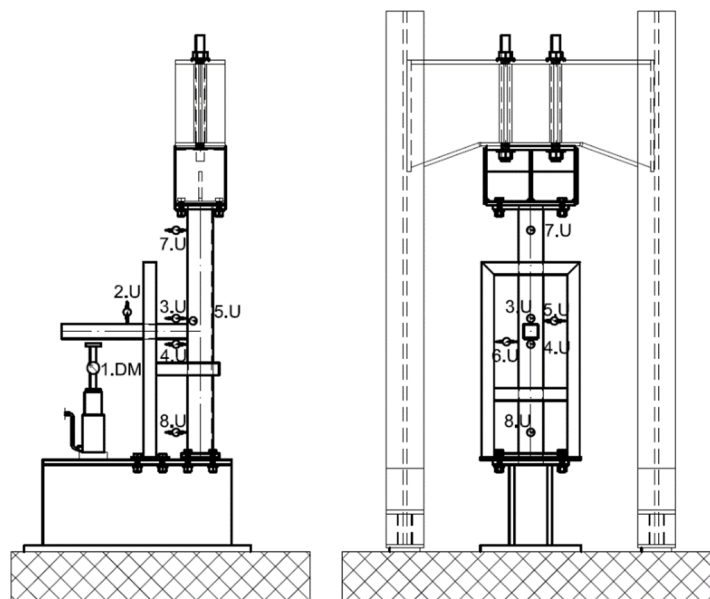
Двата материјали се моделирани како „Von Misses“ т.е со билинеарен дијаграм (Сл.5) напрегање-дилатација ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) при што првата „гранка“ на дијаграмот ја дефинира еластичната област на материјалот со соодветната граница на развлекување ( $f_y$ ) и модулот на еластичност ( $E$ ) а втората „гранка“ ја дефинира пластичната област. За пластичната област е направена компаративна анализа за оцврстувањето на пластичните дилатации при што се користени двата опишани модела во Анекс С. Споредени се резултатите на моделите со виситинското оцврстување според испитаните карактеристики и оцврстување кое е  $1/100$  од вистинскиот модул на еластичност. Како што е нагласено во повеќе научни истражувања, за вредности на пластичните дилатации до 5% (максимална дозволена дилатација) двата модела даваат приближно исти резултати што беше случај и во ова истражување па затоа сите анализи се направени со оцврстување на пластичните дилатации  $E/100$ .



Сл. 5. Билинеарен дијаграм напрегање-дилатација ( $\sigma$ - $\epsilon$ )

Јазелот е анализиран со статичка нелинеарна анализа. Користена е само материјалната нелинеарност бидејќи беше утврдено дека геометриската нелинеарност немаше големо влијание на добиените резултати туку само го зголемуваше времетраењето на анализата за околу 10 пати.

При лабораториското испитување на јазлите мерени се карактеристични параметри на 8 мерни места (сл.6) кои беа поврзани со повеќекнален мерен инструмент (QUANTUM). На мерно место 1 е поставен динамометар за контрола на силата која е нанесувана со помош на хидраулична преса. Мерно место 2 е уклономер кој го мери поместувањето на исполната. Мерните места 3, 4, 5 и 6 се индуктивни уклономи кои ги мерат локалните деформации на страните од појасот предизвикани од исполната. Мерните места 7 и 8 ја мерат „глобалната“ ротација на појасот (доколку ја има) за да може да се изврши корекција на локалните деформации во точките 3 и 4. Сите мерења се во реално време со фреквенција на запис на податоците од 5Hz.

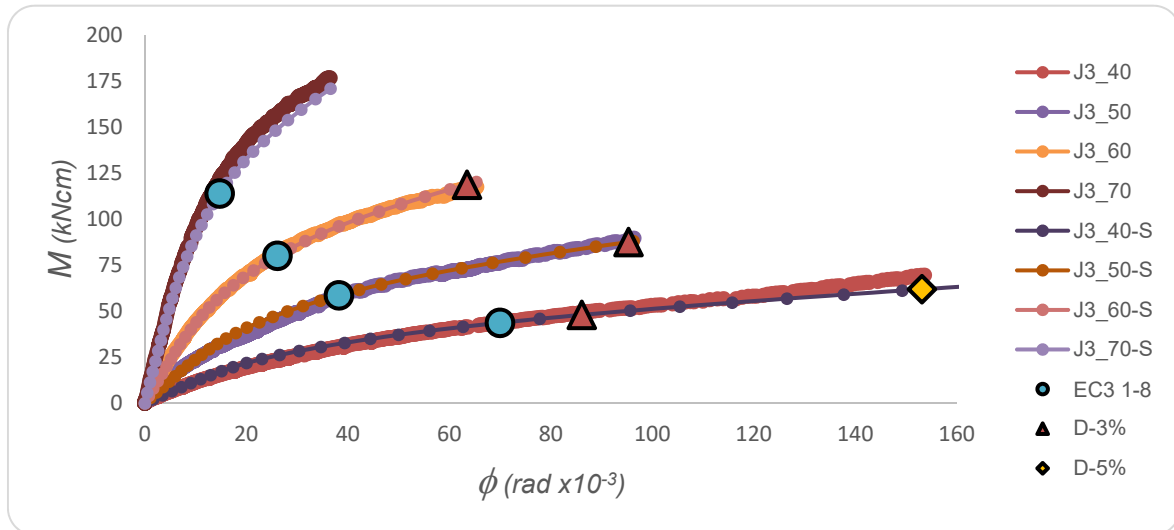


Сл. 6. Шема на мерни места и мерни инструменти

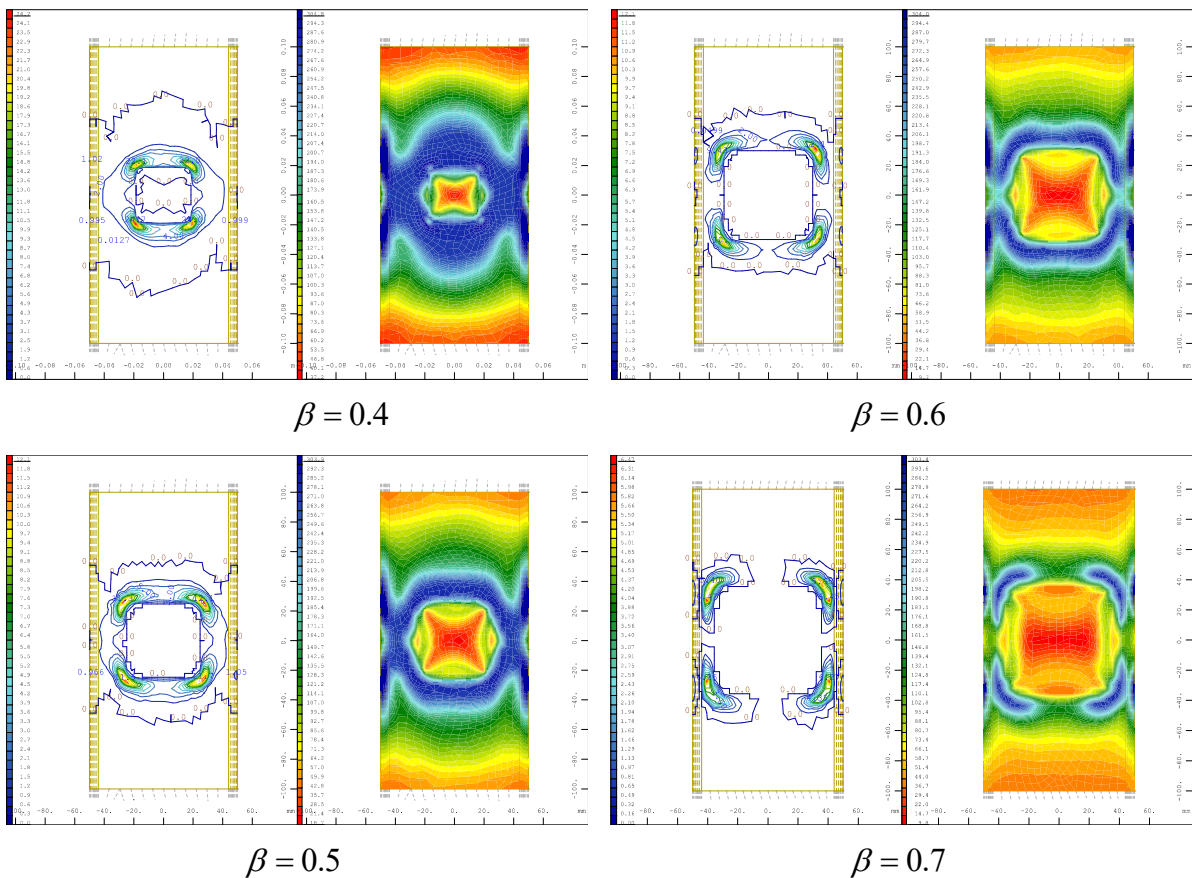
#### 4. РЕЗУЛТАТИ ОД АНАЛИЗИТЕ

##### 4.1. СЕРИЈА “J3” (појас SHS100x3 ; исполна SHS40,50,60,70 x 3)

$$\alpha = \frac{2 \cdot 1000}{100} = 20; \quad \beta = 0.4 \div 0.7; \quad 2\gamma = \frac{100}{3} = 33.3; \quad \tau = 1$$



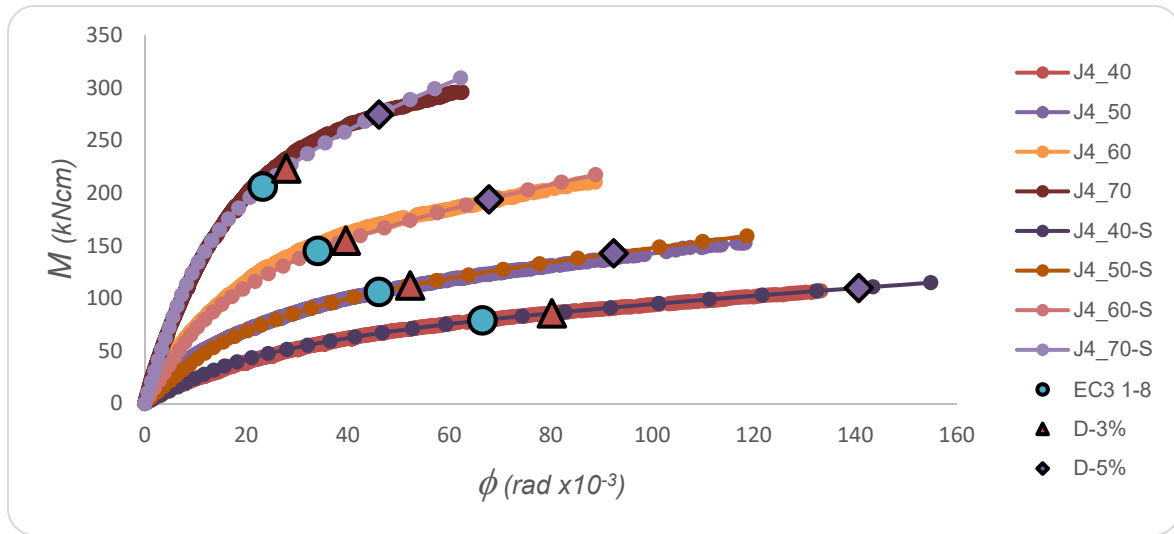
Сл. 7. М-Ф зависност за јазли од серија “J3”



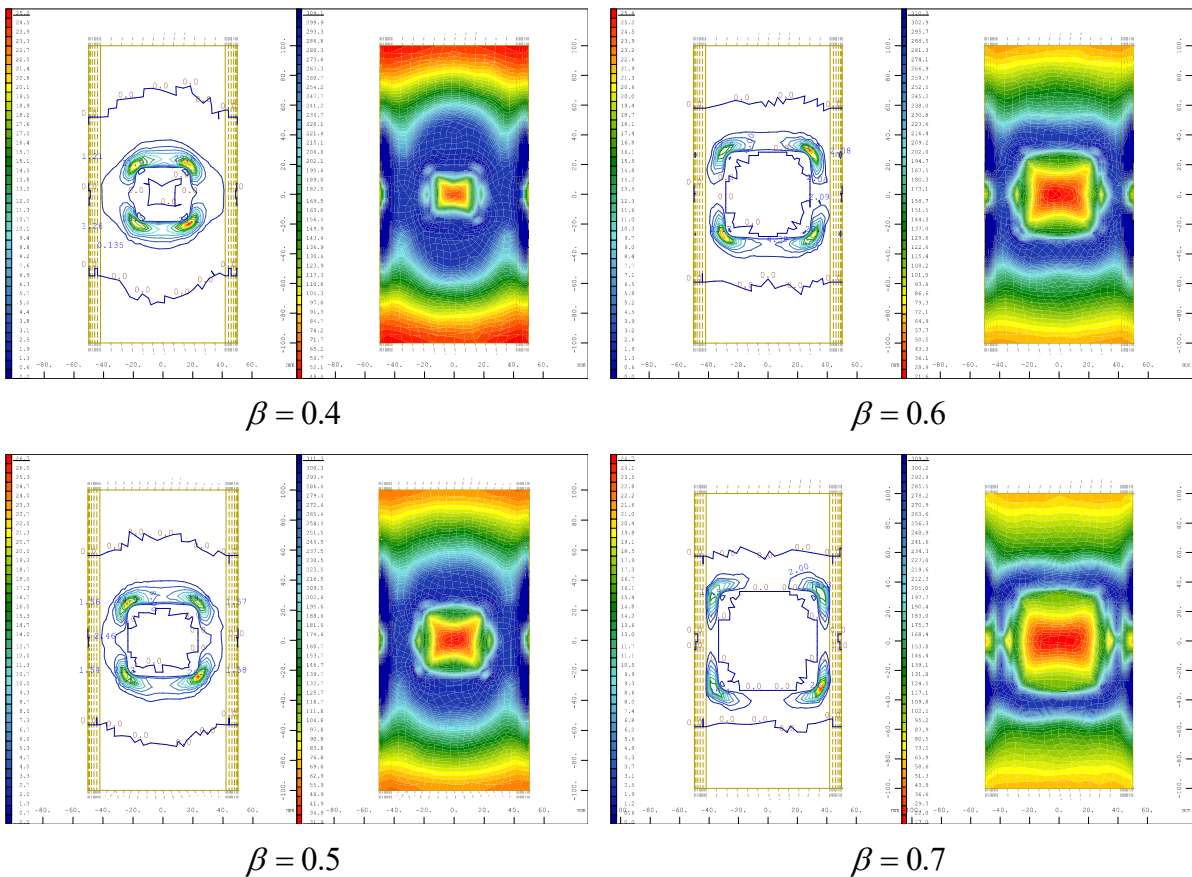
Сл. 8. Пластични дилатации и напрегања Вон Мисес за јазли од серија “J3”

4.2. СЕРИЈА “J4” (појас SHS100x4 ; исполна SHS40,50,60,70 x 4)

$$\alpha = \frac{2 \cdot 1000}{100} = 20; \quad \beta = 0.4 \div 0.7; \quad 2\gamma = \frac{100}{4} = 25; \quad \tau = 1$$



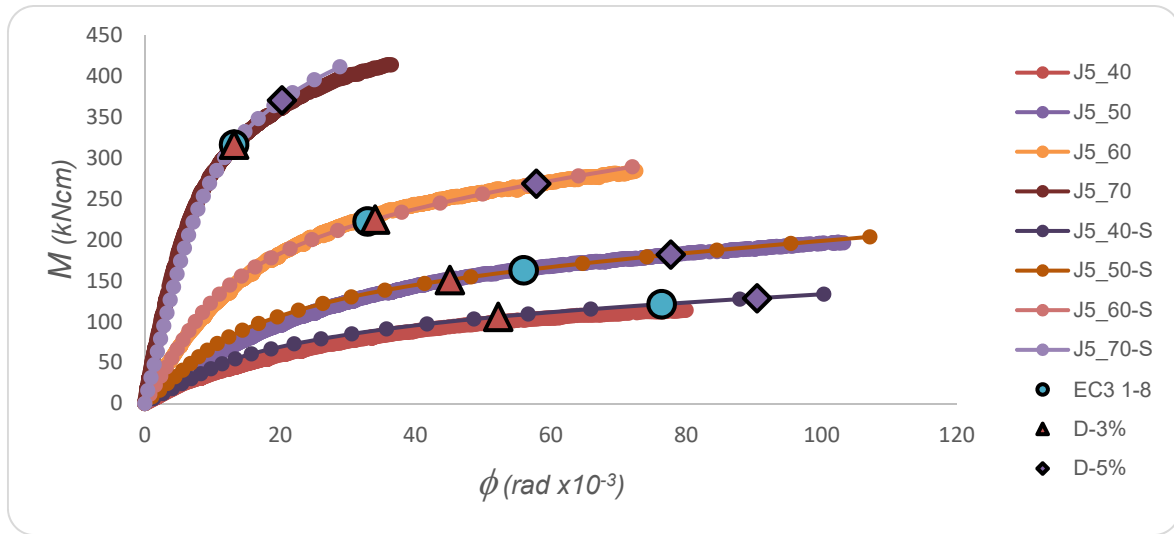
Сл. 9. М-Φ зависност за јазли од серија “J4”



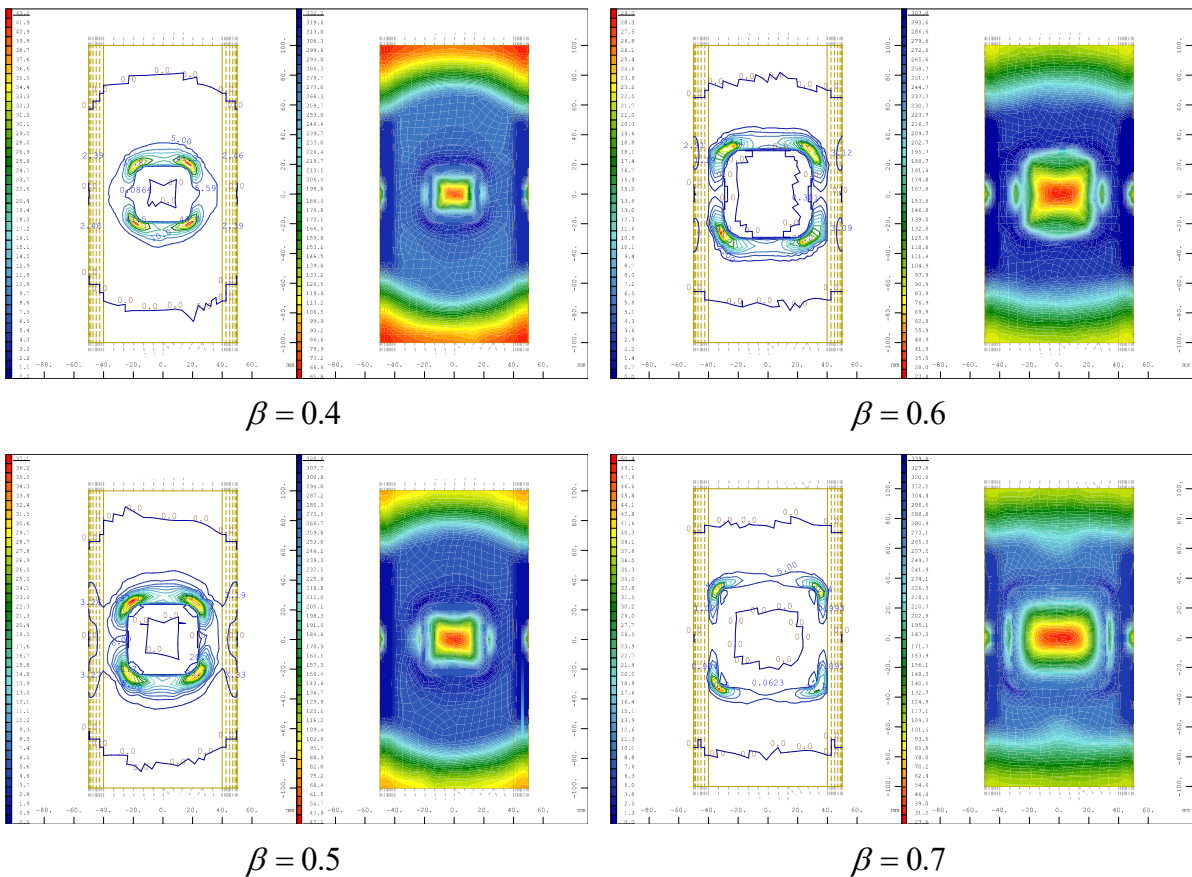
Сл. 10. Пластични дилатације и напрегања Вон Мисес за јазли од серија “J4”

4.3. ЈАЗЕЛ “J5” (појас SHS100x5 ; исполна SHS40,70 x 4 ; SHS50,60 x 5)

$$\alpha = \frac{2 \cdot 1000}{100} = 20; \quad \beta = 0.4 \div 0.7; \quad 2\gamma = \frac{100}{5} = 20; \quad \tau = 0.8 \div 1$$



Сл. 11. М-Ф зависност за јазли од серија “J5”



Сл. 12. Пластични дилатације и напрегања Вон Мисес за јазли од серија “J5”

## 5. ЗАКЛУЧОК

Од извршената анализа на лабораториски испитаните модели и соодветните аналитички 3D модели може да се заклучи дека аналитичките модели даваат прифатливи вредности за однесувањето на јазлите во однос на испитаните модели и пресметките дадени во Еврокод 3 Дел 1-8, Табела 7.14. За помалите вредности на  $\beta$  поклопувањето на резултатите е речиси идеално, додека пак за поголемите вредности на  $\beta$  кои се блиску до горната граница дефинирана во Еврокод ( $\beta = 0.85$ ) се забележува одредено отстапување на крутоста од 3D моделот и испитаниот модел што е покажано и со други истражувања [6]. Ова отстапување се случува по почеток на пластифицирање на лицето на појасот што е доста подалеку од проектната носивост и истото не претставува проблем за понатамошна анализа. Од резултатите може да се забележи дека носивоста на јазлите за  $0.4 < \beta \leq 0.6$  е дефинирана од условот за употребливост кој дозволува максимална локална деформација на лицето на појасот од 1% од ширината на цефката ( $0.01b_0$ ) при што максималната пластична дилатација е помала од 3%. Јазлите со  $0.6 < \beta \leq 0.85$  тешко се постигнува условот од 1% а и да се постигне тоа е за сметка на големи пластични дилатации ( $>5\%$ ).

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] EUROCODE 3. EN 1993-1-8, Design of steel structures Part 1.8: Design of joints, Brussels, CEN-European Committee for Standardisation, 2005.
- [2] Wang W., Chang Y., "Modeling and classification of tubular joints rigidity and its effect on the global response of CHS lattice girders", Structural Engineering and Mechanics, vol. 21, No. 6, 2005.
- [3] Korol, R.M., El-Zanaty, M., & Brady, F.J., 1977: Unequal width connections of square hollow sections in Vierendeel trusses. Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 4, No. 2, pp. 190-201.
- [4] Wardenier, J., 1982: Hollow section joints, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.
- [5] J.A. Packer, J. Wardenier, X.-L. Zhao, G.J. van der Vegte and Y. Kurobane "Design Guide for rectangular hollow section (RHS) joints under predominantly static loading, second edition, by CIDECT, 2009.
- [6] G.Z.Qiu & J.C. Zhao, "Experimental research and parameter analysis on rigidity of unstiffened tubular X-joints Tubular Structures XII.