

**ОРАЗМЕРЯВАНЕ И КОНСТРУИРАНЕ НА СЛОЖЕН ВЪЗЕЛ НА
МЕТАЛНА КОНСТРУКЦИЯ ПО МЕТОДА НА КРАЙНИТЕ
ЕЛЕМЕНТИ**
Веселин Станков¹

**DESIGNING OF A COMPLEX CONNECTION OF A STEEL
STRUCTURE BY THE FINITE ELEMENT METHOD**
Veselin Stankov¹

As technology evolves, the industry requires more complex building structures and faster building construction. As a result, structural engineers are increasingly turning to the use of steel structures. Eurocode 3 sets out the design requirements for ordinary connections but, often in practice, we have connections that are more complex than the standard described in the codes.

For the design of a public building, a steel structure was used due to the need to limit glazing displacements. There are irregularities in the plan and height of the building, and it is an irregular polygon. The connections of the structure were analysed and designed with ordinary software, but due to the complexity of the load cases, software based on the OpenSees analysis engine was also used, and the additional checks were carried out for complex connections. The OpenSees engine was developed at the University of Berkeley in California and it allows the connections of steel structures to be discretised using triangular finite elements in order to obtain a regular mesh.

The solution, obtained by CYPE 3D, was optimised with CYPE CONNECT and all code requirements were correctly verified.

Keywords:

Steel structure, Connection, Finite element, CYPE 3D, CYPE CONNECT

1. ВЪВЕДЕНИЕ

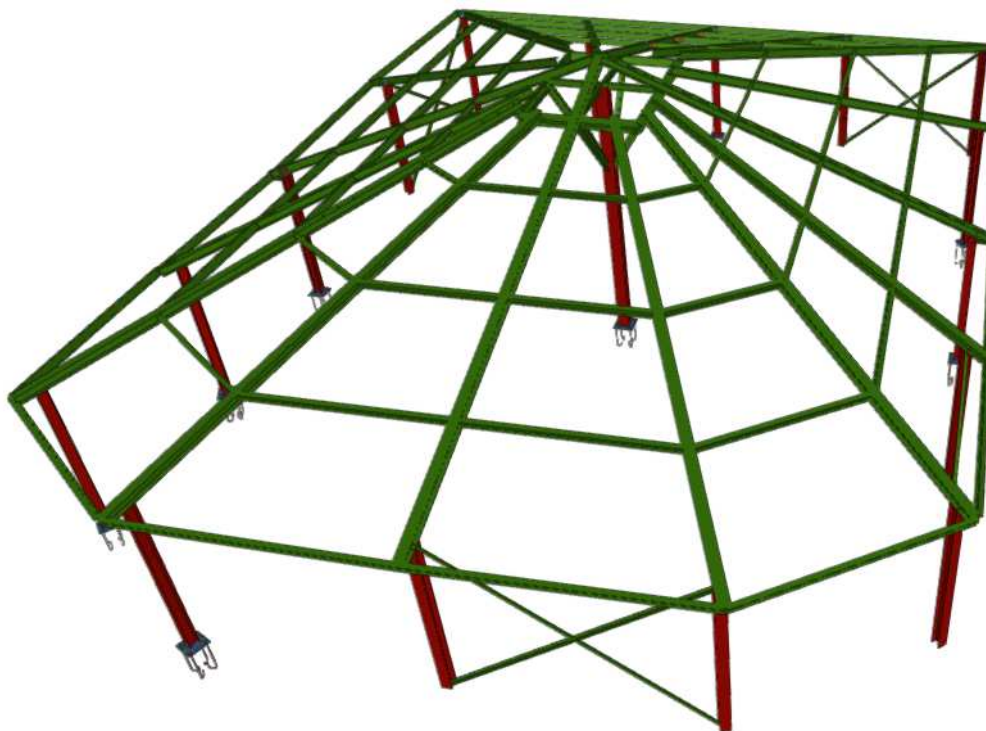
В помощ на инженерите конструктори са се наложили няколко програмни продукта, които подпомагат проектирането на стоманени конструкции. Почти всички могат да оразмерят сеченията. Напредналите софтуерни продукти оразмеряват и конструират строителните конструкции, съгласно избрани норми (EN 1993-1-8). При стандартни сечения и конструкции, които са регулярни в план и по височина тези програмни продукти са изключително полезни но при сложни по конфигурация конструкции не дават еднозначно решение. Подобни конструкции вече се срещат все по-рядко и проектантите

¹ Веселин Станков, доктор инженер, Катедра "Приложна механика", Факултет по металургия и материалознание, Химикотехнологичен и металургичен университет - София, Булевард Климент Охридски, 8, veselin.stankov@etudiant.univ-reims.fr,

се сблъскват с доста сложни по конфигурацията конструкции, за които нормите не дават еднозначно решение. С тях проектантът провежда изследване за доказване на носимоспособността на конструкциите, **но нищо повече**. Също добра алтернатива са програмните продукти позволяващи нелинеен анализ и симулация на механичното поведение конструкциите (Ansys, Abaqus), **но процесът на решение е сложен и изисква специфични познания**. При проектирането на сграда с обществено предназначение, тип заведение сме използвали програмните продукти на ©CYRE Ingenieros. Използвани са два техни модула – CYRE 3D, с помощта, на който е моделирана цялата конструкция и CYRE Connest, с чиято помощ са проверени някои от възлите.

2. ОПИСАНИЕ НА КОНСТРУКЦИЈАТА

Едно от основните изисквания на възложителя е да се ограничат преместванията и деформациите, заради предвиденото остъкление. Стоманената конструкция в план представлява неправилен многоъгълник, следващ контура на парцела. На покривната конструкция е предвидено частично остъкление за осигуряване на естествено осветление. Покривната конструкция наподобява шатра, като всички ригели се „срещат“ фиктивно с центъра на конструкцията. Четири от ригелите се срещат във върха на покривната конструкция, стъпвайки на централна колона, а останалите стъпват върху междинен пръстен, а проекцията им е също в центъра на конструкцията. Междинния пръстен поддържащ ригелите е „подпрян“ с подкоси за централната колона. Ригелите излизат конзолно 40 cm. и са свързани с междинни второстепенни греди.



Фигура 1. Обща конфигурация на конструкцията.

3. ПРОБЛЕМАТИКА

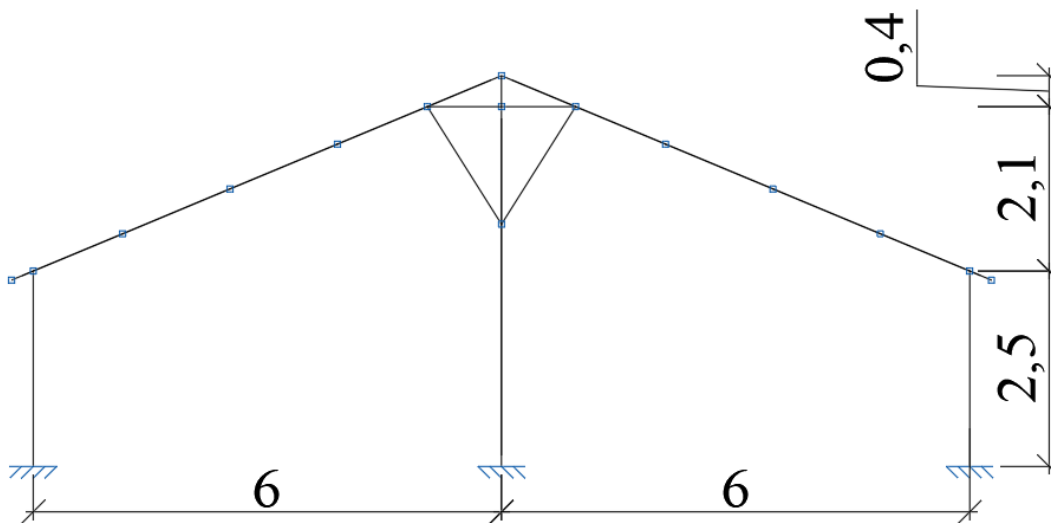
Критериите за избор на програмен продукт за моделиране на конструкцията:

- език на извод на информацията
- възможност за оразмеряване и конструиране по Еврокод
- проверки по крайни гранични състояния (КГС)
- оразмеряване и конструиране на възли

На база на гореописаните критерии е избран програмния продукт CYPE 3D
 Трудности при моделиране на конструкцията:
 - образуването на равнини за монтирането на горното осветление и термопанелите по покривната конструкция
 - пространствено ориентирани планки и срезове на конструктивните елементи
 - близки възли върху един и същ конструктивен елемент, което затруднява точните проверки по КГС

4. МОДЕЛИРАНЕ

4.1. Статическа схема



Фигура 2. Статическа схема на конструкцията.

На Фигура 2 е представена статическата схема на конструкцията. Вертикалните елементи са запънати в основите и в ригелите, а второстепенните греди са ставно свързани.

4.2. Товарни състояния

- SW - Товар от собствено тегло
- V X1 ZATVORENO - Вятър по X1 затворено
- V Y1 ZATVORENO - Вятър по Y1 затворено
- V X1 OTVORENO - Вятър по X1 отворено
- V Y1 OTVORENO - Вятър по Y1 отворено
- V X2 ZATVORENO - Вятър по X2 затворено
- V Y2 ZATVORENO - Вятър по Y2 затворено
- V X2 OTVORENO - Вятър по X2 отворено
- V X3 OTVORENO - Вятър по X3 отворено
- V X4 OTVORENO - Вятър по X4 отворено
- V Y2 OTVORENO - Вятър по Y2 отворено

SNIAG - Сняг

SX - Земемеръс X

SY - Земемеръс Y

Комбинаците на натоварването ще са дефинирани според следните критерии:

- Ситуации постоянни или временни товари
- С коефициенти на комбиниране

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{Gj} G_{kj} + \gamma_P P_k + \gamma_{Q1} \Psi_{p1} Q_{k1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Qi} \Psi_{ai} Q_{ki}$$

- Без коефициенти на комбиниране

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{Gj} G_{kj} + \gamma_P P_k + \sum_{i \geq 1} \gamma_{Qi} Q_{ki}$$

- Ситуации земетръсни

- С коефициенти на комбиниране

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{Gj} G_{kj} + \gamma_P P_k + \gamma_{AE} A_E + \sum_{i \geq 1} \gamma_{Qi} \Psi_{ai} Q_{ki}$$

- Без коефициенти на комбиниране

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{Gj} G_{kj} + \gamma_P P_k + \gamma_{AE} A_E + \sum_{i \geq 1} \gamma_{Qi} Q_{ki}$$

Където:

G_k Постоянно въздействие

P_k Въздействие от предварително налягане

Q_k Променливо въздействие

A_E Сеизмично въздействие

γ_G Частен коефициент за сигурност за постоянни въздействия

γ_P Частни коефициенти на сигурност от предварително налягане

$\gamma_{Q,1}$ Частен коефициент за сигурност за основното променливо въздействие

$\gamma_{Q,i}$ Частен коефициент за сигурност на допълнителните променливи въздействия

γ_{AE} Частен коефициент за сигурност при сеизмичното въздействие

$\Psi_{p,1}$ Коефициент на комбиниране за основното променливо въздействие

$\Psi_{a,i}$ Коефициент на комбиниране за допълнителните променливи въздействия

Таблица 1. Коефициенти.

Постоянен или временен				
	Частни коефициенти за сигурност		Коефициенти на комбиниране	
	Благоприятен	Неблагоприятен	Основен	Допълнителен
Постоянен товар (G)	1.000	1.350	-	-
Вятър (Q)	0.000	1.500	1.000	0.600
Сняг (Q)	0.000	1.500	1.000	0.500
Сеизмична				
	Частни коефициенти за сигурност		Коефициенти на комбиниране	
	Благоприятен	Неблагоприятен	Основен	Допълнителен
Постоянен товар (G)	1.000	1.000	-	-
Вятър (Q)	0.000	1.000	0.000	0.000
Сняг (Q)	0.000	1.000	0.000	0.000
Земетръс (E)	-1.000	1.000	1.000	0.300

5. РЕЗУЛТАТИ

При оразмеряването на конструктивните елементи с даденото натоварване са получени рамки с профили HEA 140 и второстепенни греди IPE 120. Получените премествания не надвишават 20mm.

5.1. Прътови елементи

В Таблица 2 са представени проведените проверки на прътовите елементи. В таблицата са дадени основните проверки по крайни гранични състояния. При липса на усилия в дадения елемент нужни за изпълнение на даден критерий, проверката не се провежда. Означенията на уравненията кореспондират с тези, дадени в Еврокод 3 EN 1993.

Таблица 2. проведени проверки на прътите

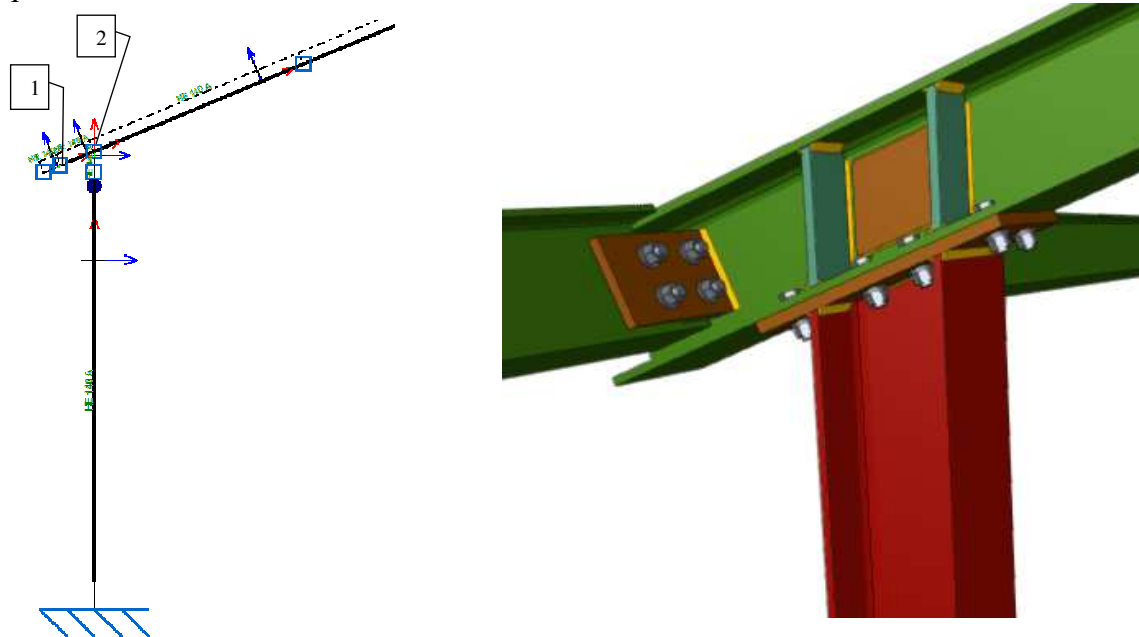
Норма	Критерий	№
Разрушаването на стеблото предизвикано от натиснатия пояс (Еврокод 3 EN 1993-1-5: 2006, Член 8)	$\frac{h_w}{t_w} \leq k \frac{E}{f_{yf}} \sqrt{\frac{A_w}{A_{rc,ef}}}$	(1)
Якост на опън (Еврокод 3 EN 1993-1-1: 2005, Член 6.2.3)	$\eta = \frac{N_{t,Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1$	(2)
Устойчивост на огъване комбинирано с нормални и срязващи сили (Еврокод 3 EN 1993-1-1: 2005, Член 6.2.10)	$V_{Ed,z} \leq \frac{V_{c,Rd,z}}{2}$	(3)
Устойчивост на огъване по ос Y (Еврокод 3 EN 1993-1-1: 2005, Член 6.2.5)	$\eta = \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1$	(4)
Устойчивост на огъване по ос Z (Еврокод 3 EN 1993-1-1: 2005, Член 6.2.5)	$\eta = \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1$	(5)
Устойчивост на срязване Z (Еврокод 3 EN 1993-1-1: 2005, Член 6.2.6)	$\eta = \frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1$	(6)
Устойчивост на срязване Y (Еврокод 3 EN 1993-1-1: 2005, Член 6.2.6)	$\eta = \frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1$	(7)
Комбинирано съпротивление на огъващ момент Y и срязваща сила Z (Еврокод 3 EN 1993-1-1: 2005, Член 6.2.8)	$V_{Ed} \leq \frac{V_{c,Rd}}{2}$	(8)
Комбинирано съпротивление на огъващ момент Z и срязваща сила Y (Еврокод 3 EN 1993-1-1: 2005, Член 6.2.8)	$V_{Ed} \leq \frac{V_{c,Rd}}{2}$	(9)
Устойчивост на огъване комбинирано с нормални сили (Еврокод 3 EN 1993-1-1: 2005, Член 6.2.9)	$\eta = \left[\frac{M_{y,Ed}}{M_{N,Rd,y}} \right]^{\alpha} + \left[\frac{M_{z,Ed}}{M_{N,Rd,z}} \right]^{\beta} \leq 1$ $\eta = \frac{N_{t,Ed}}{A \cdot f_{yd}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{W_{pl,z} \cdot f_{yd}} \leq 1$ $\eta = \frac{N_{t,Ed}}{A \cdot f_{yd}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{W_{pl,z} \cdot f_{yd}} \leq 1$	(10)
Устойчивост на огъване комбинирано с нормални и срязващи сили (Еврокод 3 EN 1993-1-1: 2005, Член 6.2.10)	$V_{Ed,z} \leq \frac{V_{c,Rd,z}}{2}$	(11)

5.2. Възли

На Фигура 3 е показана статическата схема на рамката, съдържаща разглежданите възли и цялостното им конструиране. Всеки прът е определен от два възела. Видно от схемата е, че на много малко разстояние имаме съвкупност от възли. На следващата фигура са показани двата съседни възела и решението на програмата за тяхното конструиране.

5.2.1. Възел 1

Възел 1 се състои от една главна греда и две второстепенни греди. Извършените проверки на прътите от възел 1 са показани в Таблица 3, а в Таблица 4 са показани проверките на болтовото съединение.



Фигура 3. Статическа схема на разглежданата рамка и цялостното конструиране на възела.

Таблица 3. Проверки на възел 1

Норма	Критерий	№
Главна греда		
Продъгване (Таблица 7.13 EN 1993-1-8:2005)	$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} \leq 1$	(12)
Срязване (EN 1993-1-1:2005, 6.2.6)	$V_{pl,Rd} = \frac{A_v (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}}$	(13)
Носимоспособност на опън на стеблото	$F_{Rd} = \frac{t_w^2 k_m f_y}{2 \gamma_{M0}} \left(\frac{2(t_p + 1.6w)}{d_{min}} + \frac{3d_{max} + d_{min}}{d_{max} \sqrt{\frac{d_{min}(3d_{max} + d_{min})}{2d_{max} l_{max}}}} + \frac{l_{max} 2 \sqrt{\frac{d_{min}(3d_{max} + d_{min})}{2d_{max} l_{max}}}}{d_{min}} \right)$	(14)
Второстепенна греда		
Страничен лист		
Огъващ момент (EN 1993-1-1, 6.2.5)	$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1 \quad (6.12)$	(15)
Срязване (EN 1993-1-1, 6.2.6)	$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1 \quad (6.17)$	(16)

Огъване и срязване (EN 1993-1-1, 6.2.8)	$V_{Ed} \leq \frac{V_{pl,Rd}}{2}$	(17)
Напрежения по фон Мизес в страничната планка (EN 1993-1-1:2005, 6.2.1)	$\sqrt{\sigma^2 + 3(\tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$	(18)
Изчислителна носимоспособност на смачкване (EN 1993-1-8:2005, 3.4, 3.6)	$\sqrt{\left(\frac{F_{v,Ed,y}}{F_{b,Rd,y}}\right)^2 + \left(\frac{F_{v,Ed,z}}{F_{b,Rd,z}}\right)^2} \leq 1$	(19)
Носимоспособност срещу блоково разрушаване (EN 1993-1-8:2005, 3.10.2)	$\frac{N_{Ed}}{V_{eff,Rd}} \leq 1$	(20)
Стебло		
Изчислителна носимоспособност на смачкване (EN 1993-1-8:2005, 3.4, 3.6)	$\sqrt{\left(\frac{F_{v,Ed,y}}{F_{b,Rd,y}}\right)^2 + \left(\frac{F_{v,Ed,z}}{F_{b,Rd,z}}\right)^2} \leq 1$	(21)
Носимоспособност срещу блоково разрушаване (EN 1993-1-8:2005, 3.10.2)	$\frac{N_{Ed}}{V_{eff,Rd}} \leq 1$	(22)

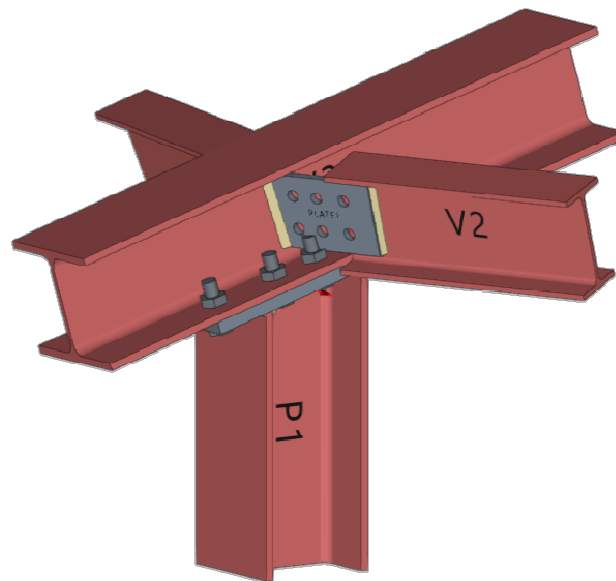
Таблица 4. проверка на болтовете

Якост										
Болт	Диаграма срязващи усилия				Опън				Взаимодействие между усилията на опън и срязване	Макс. D/C отношение (%)
	Проверка	Най-неблагоприятен (kN)	Носимоспособност (kN)	D/C отношение (%)	Проверка	Най-неблагоприятен (kN)	Носимоспособност (kN)	D/C отношение (%)	D/C отношение (%)	
1	Напречно сечение	13.833	33.720	41.02	Напречно сечение	0.859	60.696	1.42	42.03	42.03
	Смачкване	13.833	101.928	13.57	Продълъване	0.859	45.420	1.89		
2	Напречно сечение	13.749	33.720	40.77	Напречно сечение	0.347	60.696	0.57	41.18	41.18
	Смачкване	13.749	103.150	13.33	Продълъване	0.347	45.420	0.76		

Якост										
Болт	Диаграма срязващи усилия				Опън				Взаимод ействие между усилията на опън и срязване	Макс. D/C отношен ие (%)
	Провер ка	Най- неблагоп риятен (kN)	Носимосп особност (kN)	D/C отно шени е (%)	Проверка	Най- неблагоп риятен (kN)	Носимосп особност (kN)	D/C отно шени е (%)	D/C отношен ие (%)	
3	Напреч но сечение	13.008	33.720	38.58	Напречно сечение	0.859	60.696	1.42	39.59	39.59
	Смачкв ане	13.008	102.719	12.66	Продънва не	0.859	45.420	1.89		
4	Напреч но сечение	12.919	33.720	38.31	Напречно сечение	0.347	60.696	0.57	38.72	38.72
	Смачкв ане	12.919	103.181	12.52	Продънва не	0.347	45.420	0.76		

6. ПРОВЕРКИ ОСЪЩЕСТВЕНИ СЪС СУРЕ CONNECT

Програмният продукт е оценил критичната комбинация за всеки един елемент съставлящ възела и е извършил проверка на граничните пластични деформации. Проверени са отворите на болтовете съгласно EN 1993-1-8, 3.5, якостта има на срязване, съгласно EN 1993-1-8, 3.6, тяхната носимоспособност, якост на опън и якост на опън и срязване. Направени са проверки на заваръчните шевове, съгласно EN 1993-1-8, 4.5. Извършените проверки потвърждават сигурността на конструирания възел. Видно от Фигура 3, възела е труден за изпълнение. Ето защо е взето решение за оптимизиране на възела. Премахната е усиливащата планка в стеблото на ригела и усилителите както е показано на Фигура 4.

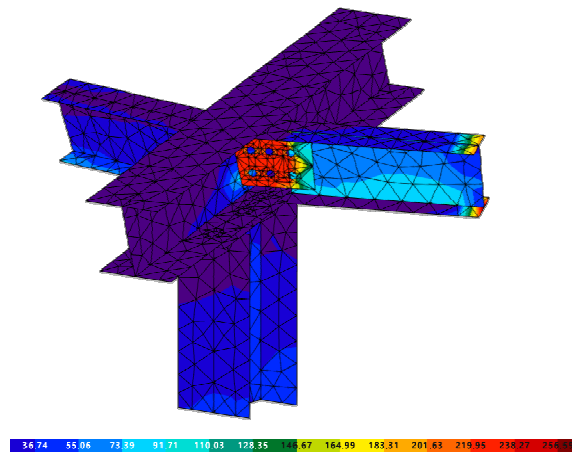


Фигура 4. Оптимизиран възел.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализа на възела чрез крайни елементи показва, че той има достатъчна носимоспособност въпреки премахнатите усилващи елементи. Възелът е оптимизиран и е по-лесен за изпълнение, без да се компрометира неговата сигурност. Деформациите и напреженията остават в еластичен стадий.

Този програмен продукт позволява както проверката, на вече изпълнени възли, така и тяхната оптимизация. Това дава възможност на проектантите да излязат извън общоприетите рамки при детайлиране.



Фигура 5. Напрежения по Фон Мизес за оптимизирания възел.

На Фигура 5 са показани напреженията по Фон Мизес за критичната комбинация и дискретизирането на елемента. Така можем да видим в какъв стадий работи материала и какъв е неговия запас за поемане на напрежения

8. ЛИТЕРАТУРА

- [1] CYPE Ingenieros, S.A. CYPE 3D – User manual
- [2] Еврокод 3 EN 1993-1-1: 2005
- [3] Еврокод 3 EN 1993-1-8