

Използване на Общия метод на стандарт EN 1993-1-1 за проектиране на самоносещи конични покриви

Любомир А. Здравков

PhD, Associate Professor, Civil Engineer

University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy, Faculty of Civil Engineering, №1 "Hristo Smirnensky" str., floor 7, Sofia 1046, Bulgaria

e-mail: zdravkov_fce@uacg.bg

A part of steel tanks have roofs with an external (above cover plates) structure. It is required by conditions of exploitation and / or should have a smooth internal surface. In that situation roof structure is formed by many radial girders and a few circular elements (rings), see Fig. 1. These elements form a 3D - structure and work together, supporting each other. When radial girders and / or circular elements are compressed and / or bended, they could lose stability on different ways:

- locally - one compressed and / or bended element loses stability;
- general - the whole structure of the roof loses stability.

Classical equations in structural mechanics require a clear effective length of elements to determine their slenderness. When structure is 3D, as a self-supporting cone roofs, is very difficult to determine effective lengths. What we should do then? How to check structure for loss of stability? As a first step we could use General method, described in standard EN 1993-1-1. The following method is very common and may be used to check loss of stability of compressed and / or bended elements, where:

- the cross sections of members are not uniform along the length of members;
- the members are loaded by combined monoaxial bending, axial forces and shear;
- the support conditions of the member is irregular.

1. Общ метод за изкълчване и измятане на конструктивни елементи. Основни принципи.

Общата носимоспособност при загуба на устойчивост извън равнината на конструктивен елемент, отговарящ на обхвата на Общия метод, може да бъде проверена по формулата:

$$\frac{\chi_{op} \cdot \alpha_{ult,k}}{\gamma_{M1}} \geq 1,0 \quad (1)$$

където:

$\alpha_{ult,k}$ е параметър за минимално увеличаване на изчислителните товари за достигане на характеристичната носимоспособност на критичното напречно сечение на конструктивния елемент, като се разглежда само неговото поведение в равнината му, без отчитане на изкълчване извън равнината му или измятане;

χ_{op} - редукиционен коефициент за условна стройност $\bar{\lambda}_{op}$, отчитащ изкълчване извън равнината или измятане;

γ_{M1} - коефициент на сигурност при загуба на устойчивост.

Общата условна стройност $\bar{\lambda}_{op}$ на конструктивен елемент, следва да бъде определена по формулата:

$$\bar{\lambda}_{op} = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr,op}}} \quad (2)$$

където:

$\alpha_{cr,op}$ е параметър за минимално увеличаване на изчислителните товари в равнината им за достигане на критичната носимоспособност на конструктивния елемент в еластичен стадий при изкълчване извън равнината или измятане, без да се отчита изкълчването в равнината на огъване.

Редукиционният коефициент χ_{op} може да се определи по един от следните начини:

а) приема се равен на минималната стойност на:

χ - при изкълчване извън равнината, съгласно 6.3.1 на стандарт EN 1993-1-1 [2];

χ_{LT} - за измятане, съгласно 6.3.2 на EN 1993-1-1,

всеки от които е изчислен за общата условна стройност $\bar{\lambda}_{op}$.

б) приема се равен на стройността, получена чрез интерполация между стойностите χ и χ_{LT} , определени по а), чрез използване на формулата за $\alpha_{ult,k}$, съответстваща на критичното напречно сечение.

Основните принципи на Общия метод, представени по-горе, ще бъдат приложени при проектирането на реален самоносещ коничен покрив.

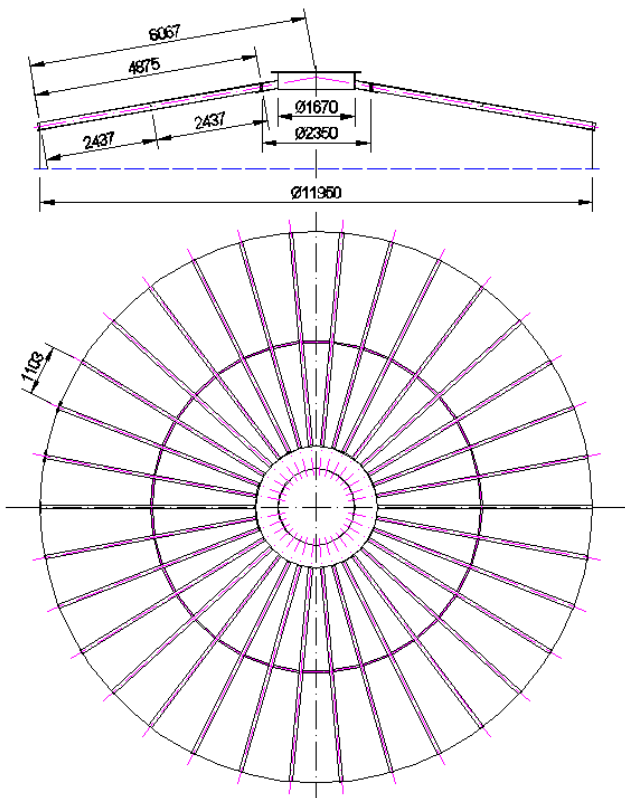
2. Геометрични данни на самоносещия коничен покрив

Проектираният тук самоносещ коничен покрив, който е използван като пример как да бъде прилаган Общия метод, е с геометрия, показана на **фиг. 1**, където:

диаметърът на цилиндричната основа – $D = 11950$ mm;
наклон на покрива – $\alpha = 10^\circ$
височина ("стрелка") на покрива – $f = 1054$ mm;
положение на конструкцията - външна (над покривната обшивка);

брой на радиалните греди – $n = 34$ бр., IPE 140;

брой на междинните пръстени по покрива – 1 пръстен в средата на радиалните греди, със сечение UPN 80;
диаметър на централния пръстен – $d = 2350$ mm;
дебелина на покривните листове – $t_{rp} = 4$ mm.



фиг. 1 - Схема на коничния покрив

Стоманата, използвана за елементите на покрива, е:

- покривни листове – 1.4571;
- покривна конструкция – 1.4301

3. Натоварване по покрива

Постоянни товари - тегло g_{rp}^n на покривните листове, имащи дебелина $t_{rp} = 4,0$ mm.

$$g_{rp}^n = t_{rp} \cdot \rho_s = 0,004 \cdot 78,5 = 0,314 \text{ kN/m}^2 \quad (3)$$

където:

$\rho_s = 78,5$ kN/m³ е плътността на стоманата.

Временни товари:

- изчислителен товар от сняг – $S = 3$ kN/m² ;
- изчислително свръхналягане – $p_o = 20$ mbar ;
- изчислително подналягане (вакуум) – $p_v = 20$ mbar;

- изчислителни подвижни товари по платформите на покрива – $Q = 3$ kN/m² ;

- изчислителна скорост на вятъра – $v = 45$ m/s .

Налягането от вятър w може да бъде определено, използвайки формулата:

$$w = \frac{v^2}{16.100} \cdot c_e \cdot k_z = \frac{45^2}{16.100} \cdot 0,7 \cdot 1,11 = 0,983 \text{ kN/m}^2 \quad (4)$$

където:

w изчислителното налягане от вятър по покрива;

$c_e = 0,7$ - аеродинамичен коефициент за конични покриви;
 $k_z = 1,11$ - коефициент, който отчита нарастването на ветровото налягане по височина. Общата височина на покрива е $h = 14,42$ m.

Изчислителна температура на покрива:

- максимална – $t_{max} = +100$ °C;

- минимална – $t_{min} = -20$ °C.

4. Комбиниране на товарите по покрива

Комбинация q_1 от товарите по покривната обшивка, имащи направление отгоре надолу:

$$q_1 = g_{rp}^n \cdot \gamma_{fg,sup} + S + \psi_0 \cdot p_v = 0,314 \cdot 1,35 + 3,0 + 0,6 \cdot 2 = 4,62 \text{ kN/m}^2 \downarrow \quad (5)$$

където:

$\gamma_{fg,sup} = 1,35$ - коефициентът за натоварване от постоянни товари, съгласно стандарт EN 1990 [1];

ψ_0 - коефициент за съчетание на 2-а или по-вече едновременно действащи временни товари, съгласно стандарт EN 1990 .

Комбинация q_2 от товарите по покривната обшивка, имащи направление отдолу нагоре:

$$q_2 = g_{rp}^n \cdot \gamma_{fg,inf} + p_o + \psi_0 \cdot w = -0,314 \cdot 1,0 + 2 + 0,6 \cdot 0,983 = 2,28 \text{ kN/m}^2 \uparrow \quad (6)$$

където:

$\gamma_{fg,inf} = 1,0$ – коефициентът за натоварване от постоянни товари, когато те действат благоприятно, виж EN 1990.

5. Определяне на усилията и оразмеряване на покривната конструкция

Използвайки подходяща изчислителна програма е създаден тримерен модел на коничния покрив. При това изследване е използван програмния продукт SAP 2000 v.14.2 [5]. В модела правите радиални греди са дефинирани като прътови елементи, с техните реални геометрични характеристики и материал. Предварително, на ниво 1-о приближение, използвайки резултатите от монтажното състояние, в модела са заложени профили **IPE 140**. За стабилизиране на радиалните греди, в средата им е поставен пръстен от профили **UPN 80**.

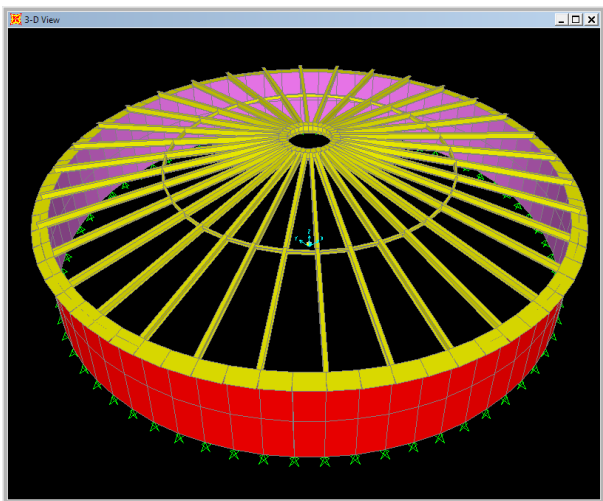
Стоманата във всички горещовалцувани профили е **1.4301**, с характеристики, съгласно EN 10088-3 [4]:

граница на провлачане $-f_y = 190 \text{ MPa}$ при $t = +20 \text{ }^\circ\text{C}$;
 $-f_y = 157 \text{ MPa}$ при $t = +100 \text{ }^\circ\text{C}$;
 якост на опън $-f_u = 500 \text{ MPa}$;
 модул на еластичността $-E = 195\,000 \text{ MPa}$;
 плътност $- \rho = 78,5 \text{ kN/m}^3$

За по-достоверни резултати е препоръчително покривните листове да не бъдат включени в модела.

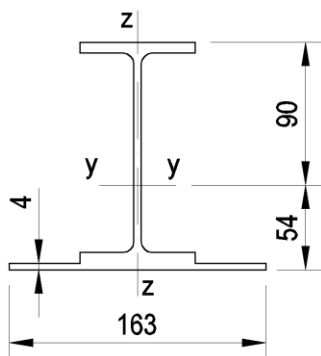
Предаването на товарите от обшивката към конструкцията е симулирано чрез използване на товарни площи. Товарите от свръхналягане, вакуум и вятър действат перпендикулярно на главните оси на радиалните греди. Натоварването от собствено тегло действа вертикално, по направление на гравитацията.

За отчитане на хоризонталното преместване на опорите на покривната конструкция, в пространствения модел допълнително са включени горния опорен пръстен и част от последния пояс на корпуса, с техните реални размери, виж **фиг. 2**.



фиг. 2 - Пространствен изчислителен модел на покрива

Съгласно EN 1993-1-4, използваният профил **ІРЕ 140** е клас 3. Горещовалцуваното сечение е заварено към покривната обшивка с непрекъснати ъглови шевове от 2-те страни на долния пояс. Полученото съставено сечение е показано на **фиг. 3**:



Геометрични характеристики:

$$A = 22,9 \text{ cm}^2$$

$$I_y = 783,3 \text{ cm}^4$$

$$I_z = 189,3 \text{ cm}^4$$

$$i_y = 5,8 \text{ cm}$$

$$i_z = 2,87 \text{ cm}$$

$$W_{el,y,sup} = 87 \text{ cm}^3$$

$$W_{el,y,inf} = 145 \text{ cm}^3$$

фиг.3 - Съставено стоманено сечение

а) проверка на радиалните греди за напрежения:

Изчислителните разрезни усилия в елементите на коничния покрив са получени при използване на

геометрически линейна постановка. Стоманата работи в еластичен стадий.

- нормални напрежения в стоманеното сечение, от натискава сила и огъващ момент

Стойностите на осовата сила и огъващия момент, отчетени от тримерния модел, са:

$N_{Ed} = -44,48 \text{ kN}$ - изчислителна сила на осовата сила в радиалната греда;

$M_{y,Ed} = 5,24 \text{ kN.m}$ - изчислителна стойност на огъващия момент спрямо ос "y-y".

$$\frac{N_{Ed}}{N_{el,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{el,y,Rd}} = \frac{44,48}{326,8} + \frac{5,24 \cdot 100}{1241,7} = 0,558 < 1 \quad (7)$$

където:

$$N_{el,Rd} = A \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 22,9 \cdot \frac{15,7}{1,1} = 326,8 \text{ kN} \quad (8)$$

$$M_{el,y,Rd} = W_{el,y,sup} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 87 \cdot \frac{15,7}{1,1} = 1241,7 \text{ kN.cm} \quad (9)$$

в която:

$f_y = 157 \text{ MPa}$ - граница на провлачане на стоманата при изчислителна температура $t = +100 \text{ }^\circ\text{C}$;

$\gamma_{M0} = 1,1$ е коефициент на сигурност по материал, съгласно стандарт EN 1993-1-4 [3];

A - цялата площ на съставеното сечение;

$W_{el,y,sup}$ - минималният еластичен съпротивителен момент спрямо ос "y-y".

- тангенциални напрежения в стоманения профил:

Изчислителната стойност на срязващата сила по дължината на радиалната греда е $V_{z,Ed} = 9,46 \text{ kN}$

$$\frac{V_{z,Ed}}{V_{z,Rd}} = \frac{9,46}{62,79} = 0,151 < 0,5 \quad (10)$$

където:

$$V_{z,Rd} = A_v \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = 7,62 \cdot \frac{15,7}{\sqrt{3} \cdot 1,1} = 62,79 \text{ kN} \quad (11)$$

в която:

$$A_v = A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + 2 \cdot r) \cdot t_f = 16,4 - 2 \cdot 7,3 \cdot 0,69 + (0,47 + 2 \cdot 0,7) \cdot 0,69 = 7,62 \text{ cm}^2 \quad (12)$$

където:

b е широчината на пояса на стоманен профил **ІРЕ 140**;

r - радиусът на снаждането пояс - стебло;

t_f - дебелината на пояса;

t_w - дебелината на стеблото .

б) проверка на радиалните греди за загуба на устойчивост като нецентрично натиснати елементи:

За извършването на анализа е използвана опцията за загуба на устойчивост в програмата SAP 2000. Чрез нея е

възможно да се отчете запаса на носеща способност, преди отделен елемент или цялата конструкция да загубят устойчивост. Решението е линейно, но с отчитане на деформациите в конструкцията на покрива.

Първо, постоянните товари, като собственото тегло на конструктивните елементи, са въведени в геометрически нелинейна постановка. След това, в деформирано от постоянните товари g_n състояние на конструкцията, е въведено натоварването от вакуум p_v^n и сняг S , за които трябва да бъде определен запасът на носеща способност. Снегът S и вакуум p_v^n са въведени с техните характеристични стойности.

Параметърът $\alpha_{ult,k}$ за най-малкото нарастване на изчислителните товари за достигане на характеристична носимоспособност, се определя чрез израза:

$$\alpha_{ult,k} \cdot \left(\frac{M_{y,Ed}}{W_{el,y}} + \frac{N_{Ed}}{A} \right) = f_y \quad (13)$$

След просто преобразуване, $\alpha_{ult,k}$ ще бъде изчислен:

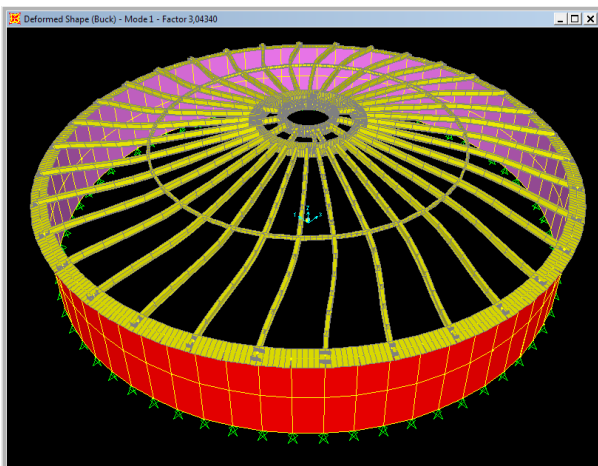
$$\alpha_{ult,k} = \frac{f_y}{\left(\frac{N_{Ed}}{A} + \frac{M_{y,Ed}}{W_{el,y}} \right)} = \frac{15,7}{\left(\frac{44,48}{22,9} + \frac{5,24 \cdot 100}{87} \right)} = 1,971 \quad (14)$$

Параметърът $\alpha_{cr,op}$ за най-малкото нарастване на изчислителните товари за да се достигне критичната носеща способност в еластичен стадий на гредите, с отчитане на възможното изкълчване или измятане, се определя по формулата:

$$\alpha_{cr,op} = \frac{g_n + K \cdot (S + \psi_0 \cdot P_v)}{g_n \cdot \gamma_{G,sup} + S + \psi_0 \cdot P_v} = \frac{0,314 + 3,0434 \cdot (3 + 0,6 \cdot 2)}{0,314 \cdot 1,35 + 3 + 0,6 \cdot 2} = 2,832 \quad (15)$$

където:

$K = 3,0434$ е коефициент на загуба на устойчивост, определен чрез използване на SAP 2000 и пространствен изчислителен модел, виж **фиг. 4**.



фиг.4 - Деформирана форма на коничния покрив, когато той губи устойчивост под въздействие на постоянни товари g_n , сняг S и подналягане p_v

Общата условна стройност $\bar{\lambda}_{op}$ на конструктивен елемент се определя чрез формулата:

$$\bar{\lambda}_{op} = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr,op}}} = \sqrt{\frac{1,971}{2,832}} = 0,834 \quad (16)$$

Коефициентът χ_z за загуба на устойчивост спрямо ос "z-z" се определя чрез израза:

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{\Phi_z^2 - \bar{\lambda}_{op}^2}} = \frac{1}{1,088 + \sqrt{1,088^2 - 0,834^2}} = 0,559 \quad (17)$$

където:

$$\Phi_z = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_{op} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}_{op}^2] = 0,5 \cdot [1 + 0,76 \cdot (0,834 - 0,2) + 0,834^2] = 1,088 \quad (18)$$

в която:

α е коефициент на несъвършенствата, виж EN 1993-1-4 [3]
 $\bar{\lambda}_0$ - гранична стройност.

Коефициентът χ_{LT} за измятане може да бъде определен по формулата:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{op}^2}} = \frac{1}{1,013 + \sqrt{1,013^2 - 0,834^2}} = 0,63 \quad (19)$$

където:

$$\Phi_{LT} = 0,5 \cdot [1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{op} - 0,4) + \bar{\lambda}_{op}^2] = 0,5 \cdot [1 + 0,76 \cdot (0,834 - 0,4) + 0,834^2] = 1,013 \quad (20)$$

в която:

α_{LT} е коефициент на несъвършенствата, виж EN 1993-1-4.

Редукционният коефициент χ_{op} , отчитащ изкълчване извън равнината или измятане, е по-малката от стойностите на коефициентите χ_z и χ_{LT} :

$$\chi_{op} = \min \begin{cases} \chi_z = 0,559 \\ \chi_{LT} = 0,63 \end{cases} \quad (21)$$

Общата носимоспособност при загуба на устойчивост извън равнината на конструктивен елемент се определя чрез израза:

$$\frac{1}{\chi_{\text{оп}}}\left(\frac{N_{\text{Ed}}}{A} + \frac{M_{y,\text{Ed}}}{W_{\text{el},y}}\right) = \frac{1}{0,559}\left(\frac{44,48}{22,9} + \frac{5,24 \cdot 100}{87}\right) = \quad (22)$$

$$= 14,25 \text{ kN/cm}^2 < \frac{f_y}{\gamma_{\text{M1}}} = 14,27 \text{ kN/cm}^2$$

Съгласно направения по-горе анализ на коничния покрив, при който е използван числен пространствен модел, и базирайки се на Общия метод в EN 1993-1-1, радиалните греди могат да бъдат с профил **IRE 140**.

6. Изводи

Когато строителната конструкция е пространствена, всички елементи в нея са натоварени заедно и едновременно. Те си влияят и се подпират един друг. В този случай е много трудно да бъде определено кой елемент е подпрян и кой е подпиращ. Невъзможно е да бъде определено в явен вид тяхната ефективна изкълчвателна дължина, а тези дължини са използвани в класическите уравнения на стандартите при проверка на елементите за загуба на устойчивост. В този аспект е разумно да бъде използван Общият метод, описан в европейския стандарт EN 1993-1-1 [2]. Този метод е удобен за ползване, но за съжаление не може да бъде прилаган без добри компютърни умения и подходящ конструктивен софтуер, имащ модул за изследване на загубата на устойчивост.

Общият метод е много мощен инструмент за изследване на пространствени конструкции като самоносещи конични и сферични покриви за местна и обща форма на загуба на устойчивост.

Литература

1. EN 1990:2002, Eurocode - Basis of structural design.
2. EN 1993-1-1:2005, Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings
3. EN 1993-1-4:2006, Design of steel structures - Part 1-4: General rules - Supplementary rules for stainless steels.
4. EN 10088 - 3:2005, Stainless steels. Technical delivery conditions for semi-finished products, bars, rods, wire, sections and bright products of corrosion resisting steels for general purposes.
5. SAP 2000 v.14.2. Structural analysis program. Computers and Structures, Inc.