

Változó keresztmetszetű acél keretszerkezetek optimális tervezése tűzhatással szemben

2018. november 9.

Acélszerkezetek tűzvédelmi tervezése workshop

Dr. Balogh Tamás
Szoftverfejlesztő mérnök
Inter-CAD Kft.
tbalogh@axisvm.eu



AXISVM

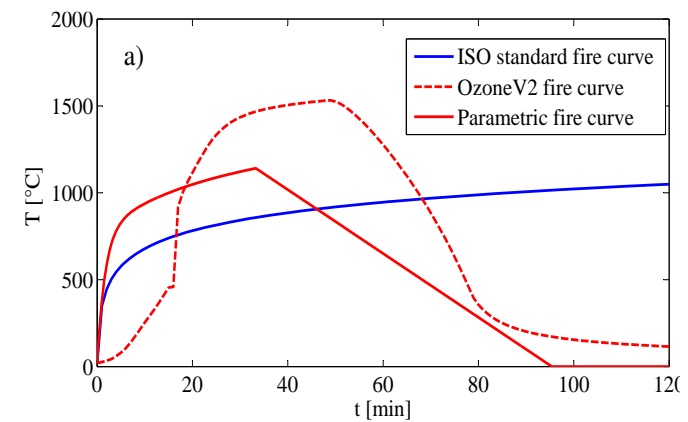
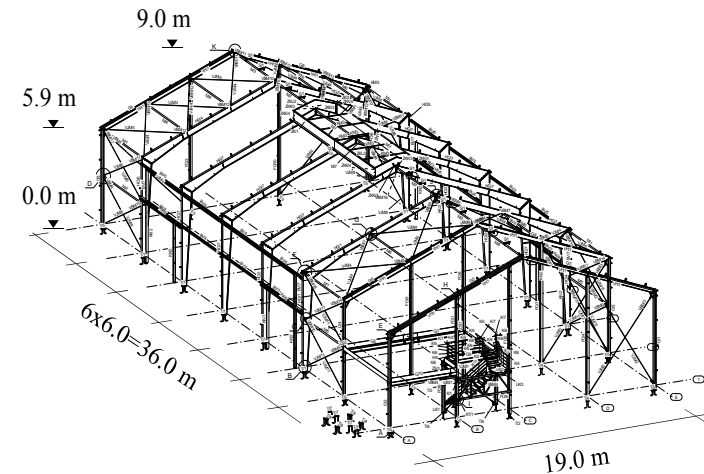
Dr. Vigh László Gergely
Egyetemi docens
BME, Hidak és Szerkezetek Tanszék
vigh.l.gergely@epito.bme.hu



Motiváció:

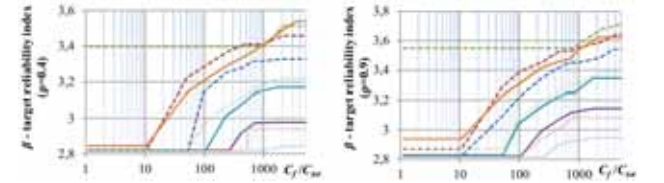
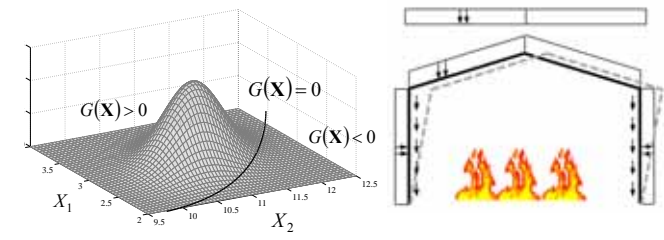
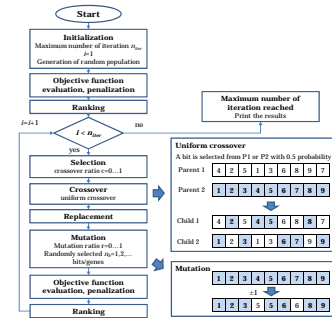
- **tűzhatással szembeni méretezés**
- **rendkívüli nemlinearitás**
- **nem konvex és diszkrét jelleg**
- gazdaságos szerkezet megtalálása **időigényes próbálgatási folyamat,**

- változó keresztmetszetű, acél csarnokszerkezetek **optimális tervezése tűzhatással szemben** kevésbé vizsgált terület,
- **optimális szerkezetválasztás vizsgálata,**
- **tervezési koncepciók kidolgozása,**
- megfelelő **megbízhatósági szint vizsgálata.**



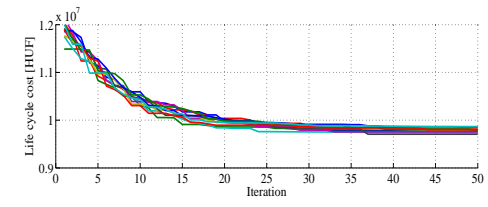
Célok:

- szerkezetoptimaló keretrendszer kidolgozása,
- hatékony megbízhatósági analízis eszközök kidolgozása,
- megbízhatósági index célértékek vizsgálata és bemutatása tűzhatással szembeni méretezéshez,
- paraméteres vizsgálat keretén belül különböző optimális szerkezeti megoldások vizsgálata,
- új és hasznos tervezési koncepciók kidolgozása tervezőmérnökök számára.



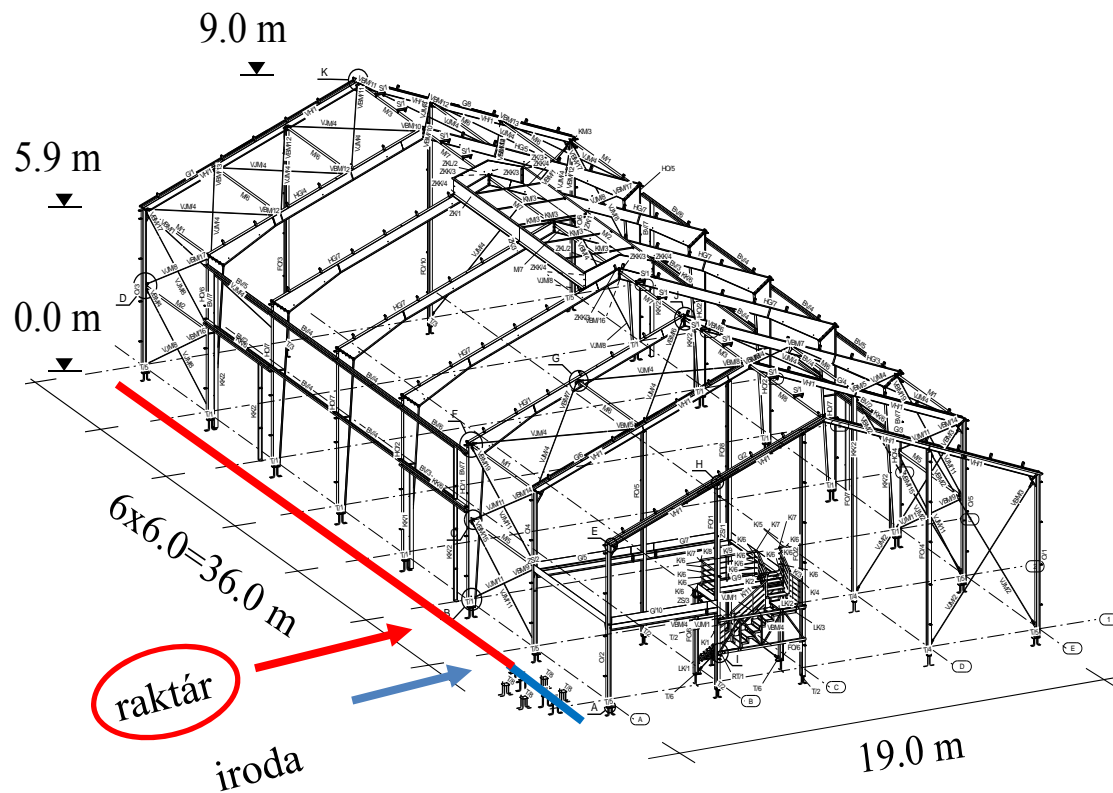
50 years service life: calculated

| Relative cost of safety measures | Minor consequences | Moderate consequences | Large consequences |
|----------------------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|
| High - Severe fire | 2.8 (2.8 - 2.9) | 2.8 - 3.0 (2.8 - 3.1) | 2.8 - 3.2 (2.8 - 3.4) |
| Moderate - Medium fire | 2.8 (2.8 - 3.0) | 2.8 - 3.2 (2.8 - 3.4) | 2.8 - 3.5 (2.8 - 3.6) |
| Low - Minor fire | 2.8 (2.8 - 3.0) | 2.8 - 3.3 (2.8 - 3.4) | 3.2 - 3.5 (3.2 - 3.7) |



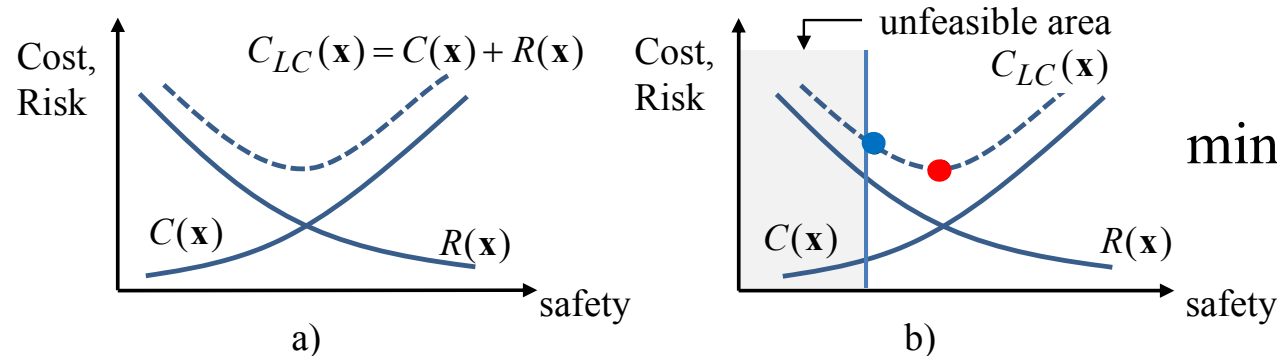
| Iteration | Cost | Reliability | Weight | ... |
|-----------|------------|-------------|--------|-----|
| 1 | 1.2 | 2.8 | 1.0 | ... |
| 2 | 1.15 | 2.85 | 1.0 | ... |
| 3 | 1.1 | 2.9 | 1.0 | ... |
| 4 | 1.05 | 2.95 | 1.0 | ... |
| 5 | 1.02 | 3.0 | 1.0 | ... |
| 6 | 1.01 | 3.05 | 1.0 | ... |
| 7 | 1.005 | 3.1 | 1.0 | ... |
| 8 | 1.002 | 3.15 | 1.0 | ... |
| 9 | 1.001 | 3.2 | 1.0 | ... |
| 10 | 1.0005 | 3.25 | 1.0 | ... |
| 15 | 1.0001 | 3.3 | 1.0 | ... |
| 20 | 1.00005 | 3.35 | 1.0 | ... |
| 25 | 1.00001 | 3.4 | 1.0 | ... |
| 30 | 1.000005 | 3.45 | 1.0 | ... |
| 35 | 1.000001 | 3.5 | 1.0 | ... |
| 40 | 1.0000005 | 3.55 | 1.0 | ... |
| 45 | 1.0000001 | 3.6 | 1.0 | ... |
| 50 | 1.00000005 | 3.65 | 1.0 | ... |

Vizsgált szerkezet:



| Type | Value |
|------------------------------|------------------------|
| dead load of the frame | calculated |
| dead load of the roof system | 0.2 kN/m ² |
| weight of the equipment | 0.2 kN/m ² |
| snow | 1.25 kN/m ² |
| velocity pressure of wind | 0.58 kN/m ² |

Szerkezetoptimaló algoritmus kifejlesztése - célfüggvény:



$$\min C_{LC}(\mathbf{x}) = \min[C(\mathbf{x}) + R(\mathbf{x})]$$

Célfüggvény tűzhatással szembeni méretezéshez:

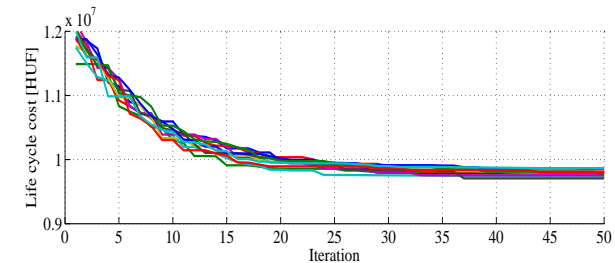
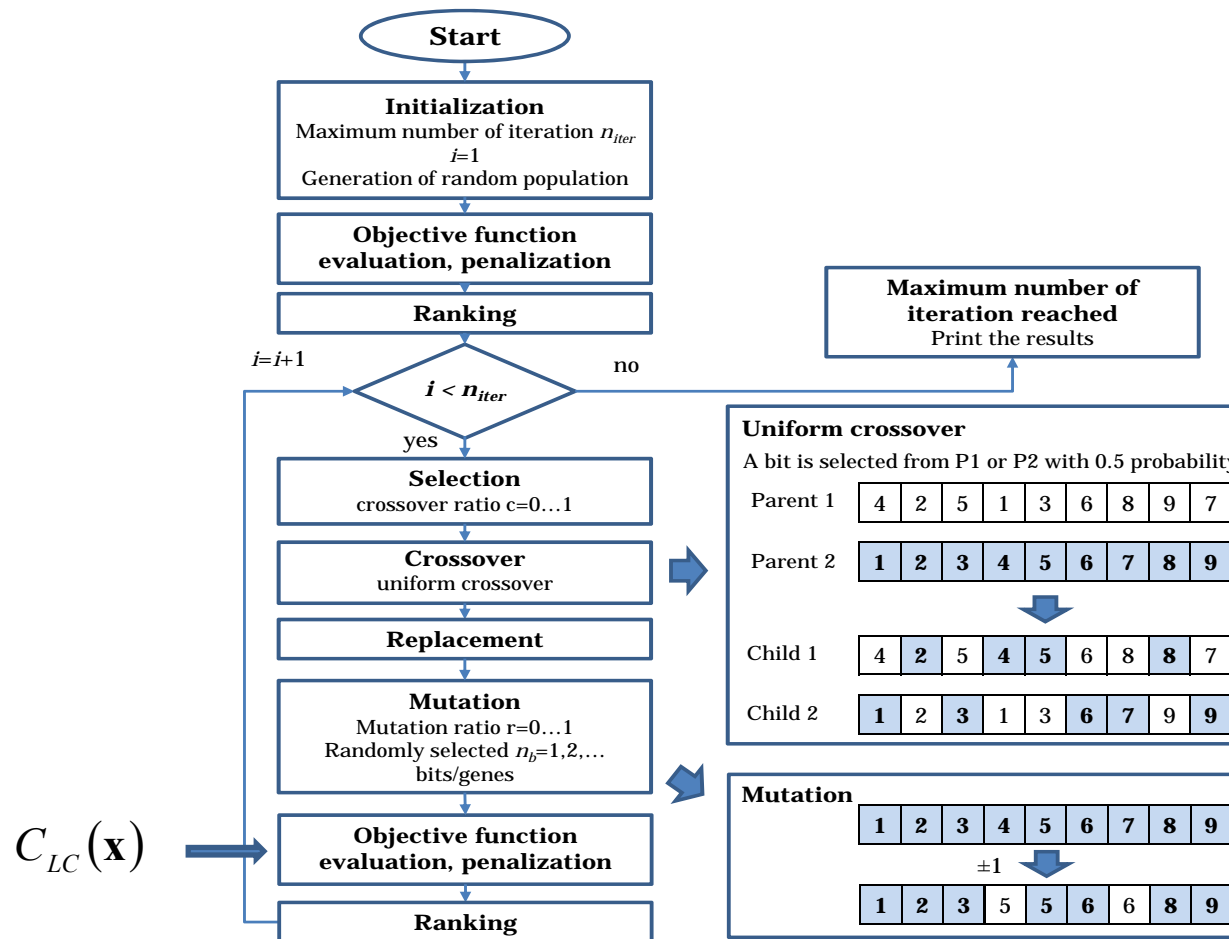
$$C_{LC}(\mathbf{x}) = \underbrace{C_0(\mathbf{x}) + C_1(\mathbf{x}) + C_2 + \dots}_{C(\mathbf{x})} + \underbrace{C_f \cdot P_f(\mathbf{x}) + 0.01C_f \cdot P_{ignition} + 0.05C_f \cdot P_{ignition+intervention}}_{R(\mathbf{x})}$$

$C_0(\mathbf{x})$ acélszerkezet

$C_1(\mathbf{x})$ passzív tűzvédelem

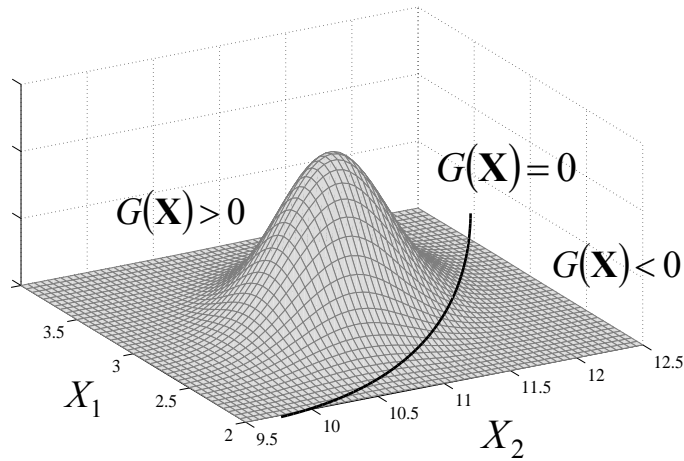
C_2 aktív tűzvédelem

Szerkezetoptimáló algoritmus kifejlesztése - GA:



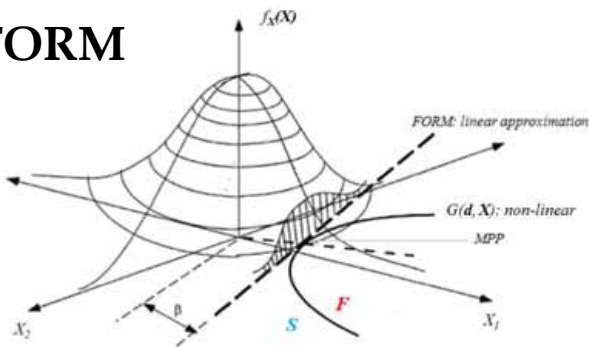
$$\min! C_{LC}(\mathbf{x}) \cdot g_{SLS}(\mathbf{x}) \cdot g_{ULS}(\mathbf{x}); \quad g_i(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1 & \eta_i(\mathbf{x}) \leq \eta_{lim,i} \\ \eta_i(\mathbf{x})^2 & \eta_{lim,i} < \eta_i(\mathbf{x}) \end{cases} \quad \text{ULS, SLS határállapotok vizsgálata hagyományos terhekre.}$$

Megbízhatósági analízis:



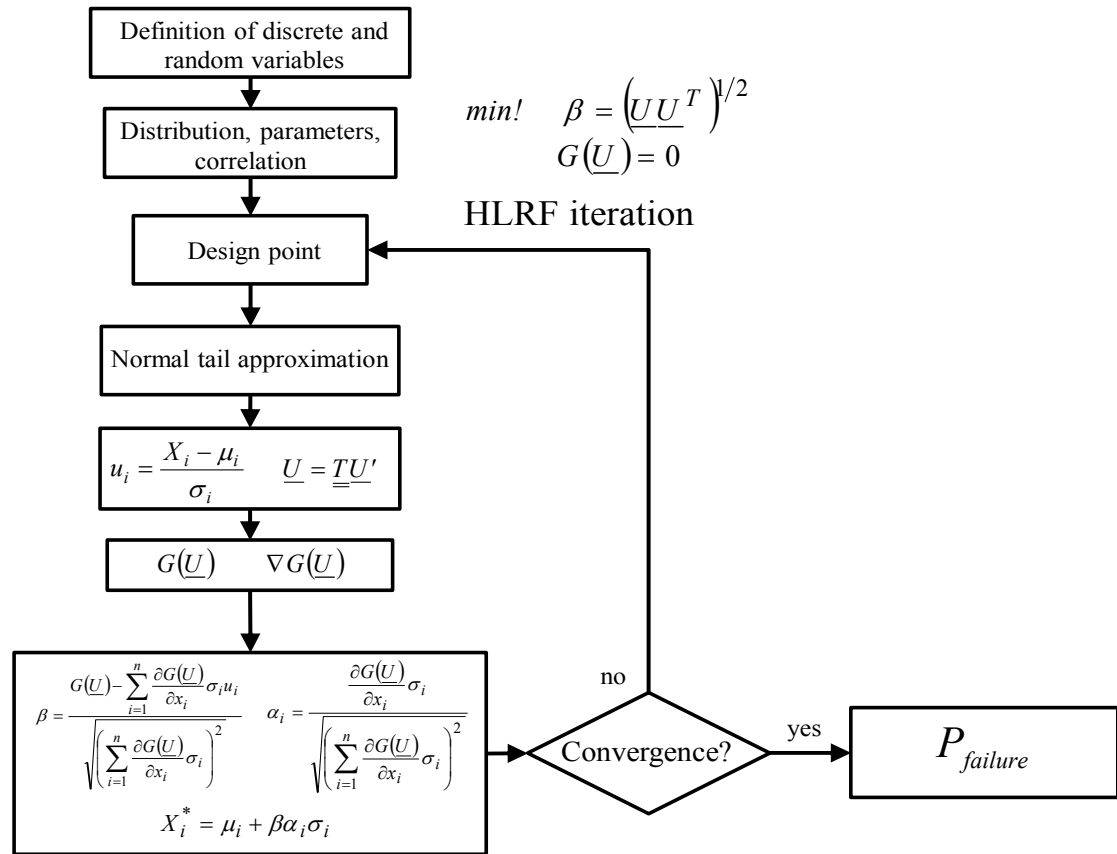
$$P_f = P\{G(\mathbf{X}) < 0\} = \int_{G(\mathbf{X}) < 0} f(\mathbf{X}) d\mathbf{X}$$

FORM

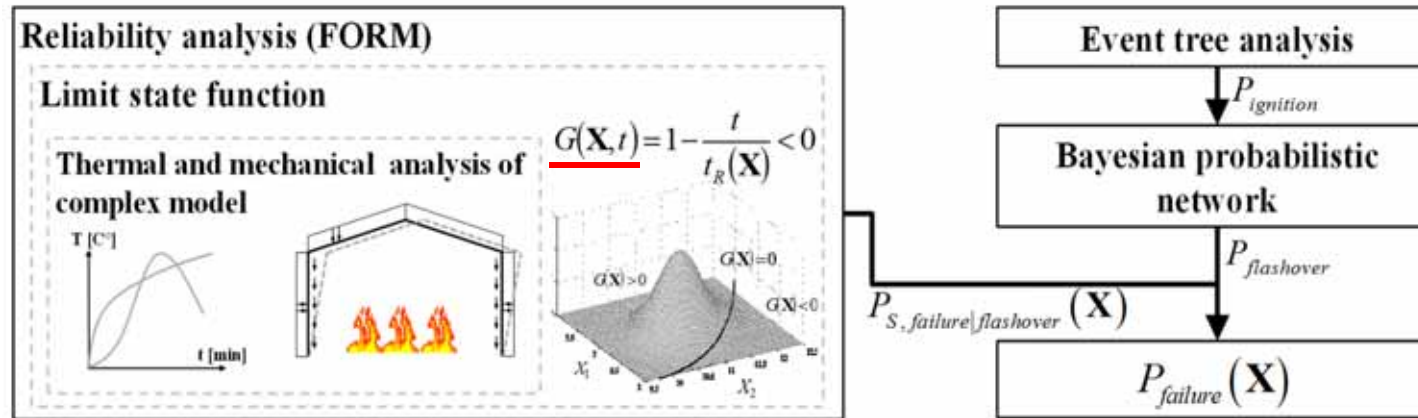


[Lopez & Beck, 2012]

$$C_{LC}(\mathbf{x}) = \underbrace{C_0(\mathbf{x}) + C_1(\mathbf{x}) + C_2 + \dots}_{C(\mathbf{x})} + \underbrace{C_f \cdot P_f(\mathbf{x}) + 0.01C_f \cdot P_{ignition} + 0.05C_f \cdot P_{ignition+intervention}}_{R(\mathbf{x})}$$



Csarnokszerkezet megbízhatóságának számítása - tűzhatás:

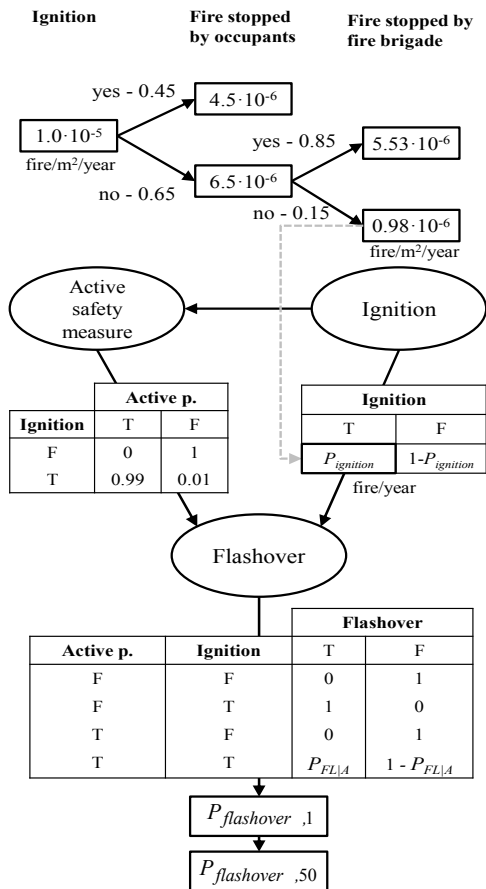


$$P_f = P_{S,f|flashover}(\mathbf{X}) \cdot P_{flashover}$$

- megbízhatósági analízis során **nem elkülönített elemek** megbízhatóságának számítása történik, hanem a **teljes szerkezeti rendszeré**;
- **bármilyen típusú tűzgörbe** figyelembevétele;
- megbízhatósági analízisen belül a szerkezet **nemlineáris analízise a termikus hatás figyelembevételével**;
- megbízhatóság számítása **idő alapon**.

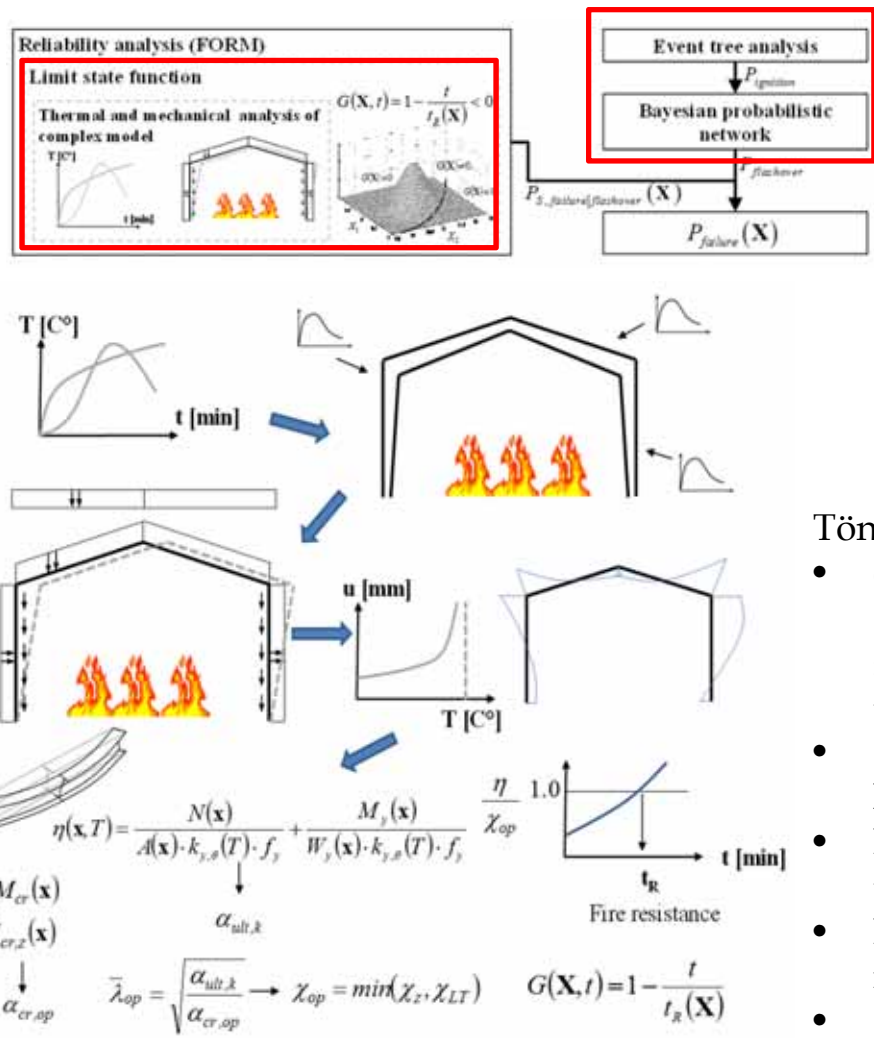
Csarnokszerkezet megbízhatóságának számítása - tűzhatás:

tűzgyulladás



aktív tűzvédelem

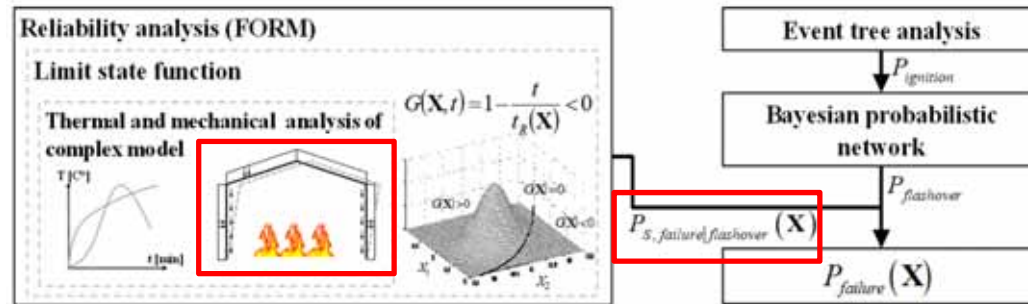
független események: 1 év → 50 év



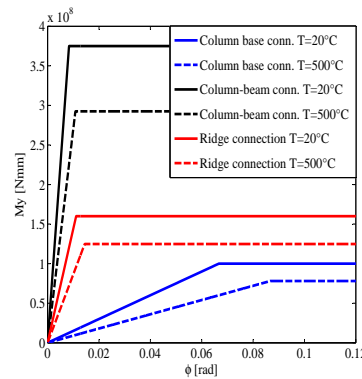
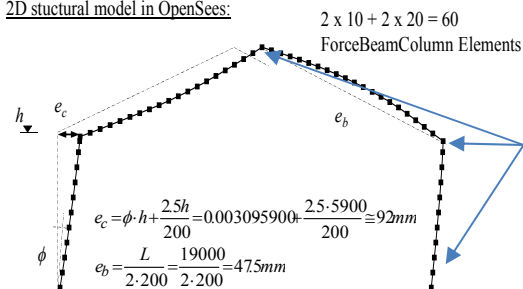
Tönkrementeli módok:

- oszlop- és gerendaelemek stabilitási és szilárdsági tönkrementele
- gerinclemezek nyírási horpadása;
- kapcsolatok szilárdági tönkrementele;
- képlékeny mechanizmus;
- globális stabilitásvesztés.

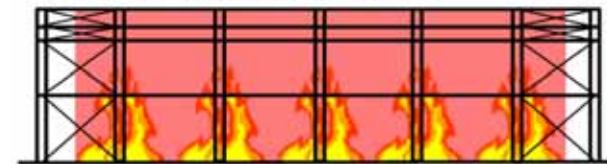
Csarnokszerkezet megbízhatóságának számítása - tűzhatás:



2D structural model in OpenSees:



5 frames are exposed to fire

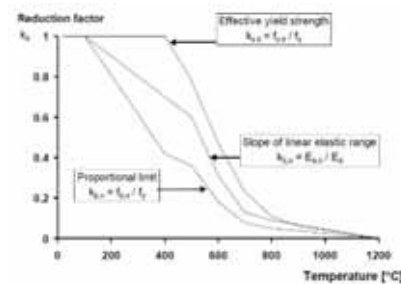


Soros rendszer esetén:

$$\beta_{S,f} \cong -\Phi^{-1}(P_{S,f}) = -\Phi^{-1}(1 - \Phi_m(\beta, \rho))$$

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_{1,f} \\ \beta_{2,f} \\ \dots \\ \beta_{n,f} \end{bmatrix}; \quad \rho = \begin{bmatrix} 1 & \rho_{12} & \dots & \rho_{1n} \\ \rho_{21} & 1 & \dots & \rho_{2n} \\ \dots & \dots & 1 & \rho_{3n} \\ \rho_{n1} & \rho_{n2} & \rho_{n3} & 1 \end{bmatrix} \quad \rho_{ij} = \rho_{ji}$$

- hőtágulás
- hőmérsékletfüggő szilárdság
- hőmérsékletfüggő merevség



Csarnokszerkezet megbízhatóságának számítása - tűzhatás:

$$R = \frac{d}{\lambda} = \left(\frac{t}{2400 (T - 140)} \right)^{1/0.77} \frac{A}{V}$$

Rétegvastagság és anyagszükséglet:

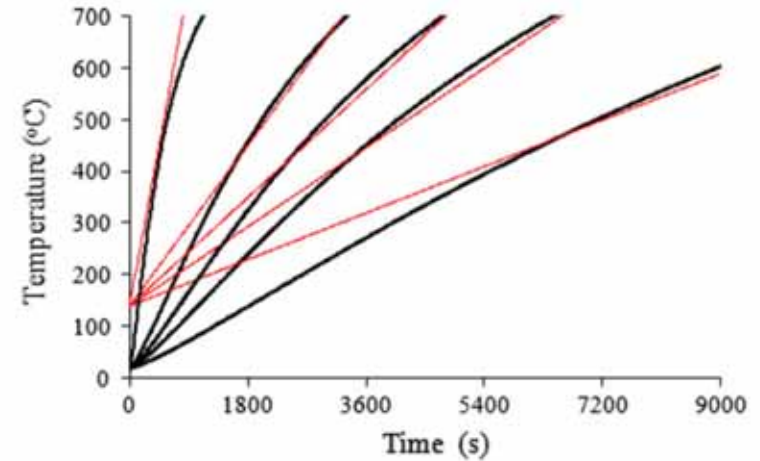
ÉME A-19/2001 szerint, 5 mm falvastagságot meghaladó szerkezetek esetén

| tűzállóság | száraz rétegvastagság | anyagszükséglet (elméleti) |
|------------|-----------------------|----------------------------|
| R30 | 520 μm | 0,9 kg/m ² |
| R45 | 920 μm | 1,6 kg/m ² |
| R60 | 1950 μm | 3,5 kg/m ² |

MSZ EN 13381-8 szabvány szerint

T_{krit} = 550°C

| Profil tényező U/A m ⁻¹ | A bevonat minimális vastagsága (mm) ha a biztosítandó tűzállósági határérték | | |
|---------------------------------------|---|-------|-------|
| | R30 | R45 | R60 |
| 65 | 0,236 | 0,547 | 0,757 |
| 80 | 0,243 | 0,627 | 0,988 |
| 100 | 0,286 | 0,735 | 1,236 |
| 120 | 0,329 | 0,849 | 1,365 |
| 140 | 0,372 | 1,034 | 1,493 |
| 160 | 0,415 | 1,201 | 1,621 |
| 180 | 0,458 | 1,296 | 1,749 |
| 200 | 0,500 | 1,391 | 1,877 |
| 220 | 0,543 | 1,468 | - |
| 240 | 0,586 | 1,581 | - |
| 260 | 0,629 | 1,676 | - |
| 280 | 0,672 | 1,771 | - |
| 300 | 0,715 | 1,866 | - |
| 320 | 0,757 | - | - |
| 340 | 0,800 | - | - |
| 360 | 0,876 | - | - |
| 380 | 1,059 | - | - |

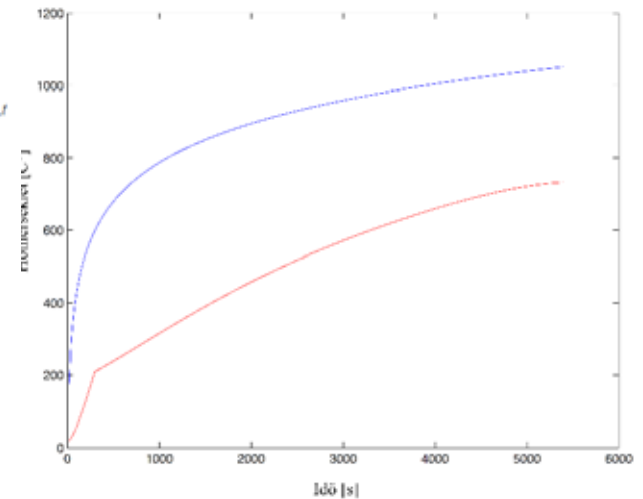


$$\Delta\theta_{s,t} = \frac{\lambda_p A_p / V (\theta_{g,t} - \theta_{s,t-1})}{d_p c_s \rho_s (1 + \varphi/3)} \Delta t - (e^{\varphi/10} - 1) \Delta\theta_{g,t}$$

$$\varphi = \frac{c_p \rho_p}{c_s \rho_s} d_p A_p / V$$



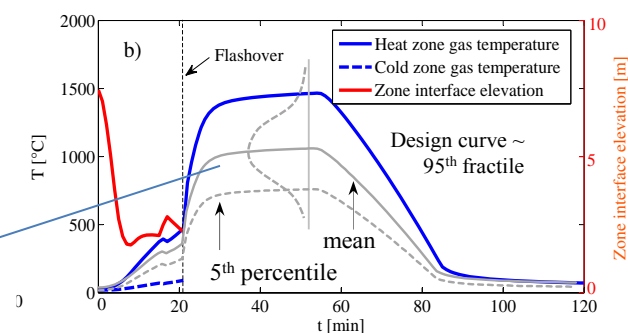
$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\theta_{g,t} - \theta_{a,t-1}}{R_{eq} \cdot c_a \cdot \rho_a} \frac{A}{V} \Delta t$$



Csarnokszerkezet megbízhatóságának számítása - tűzhatás:

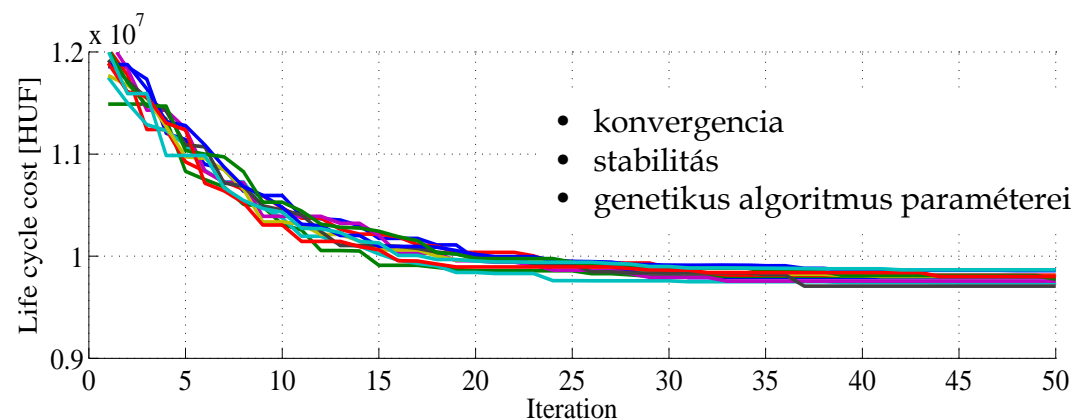
| Valószínűségi változó | μ | CoV | Eloszlás | Forrás |
|---|---------|-------|-------------|---|
| folyáshatár [MPa] | 388 | 0.07 | lognormális | (JCSS, 2000) |
| gépészeti teher [kN/m ²] | 0.2/0.5 | 0.2 | normális | |
| szélteher [kN/m ²] | 0.06 | 1.963 | lognormális | Calculation, EC0, (JCSS, 2000), EC1-1-4 |
| hóteher [kN/m ²] | 0.205 | 1.03 | Weibull | Calculation, EC0, (JCSS, 2000), EC1-1-3 |
| oszloptalp kapcsolat ellenállásának bizonytalansága [-] | 1.25 | 0.15 | lognormális | (JCSS, 2000) |
| oszlop-gerenda kapcsolat ellenállásának bizonytalansága [-] | 1.25 | 0.15 | lognormális | (JCSS, 2000) |
| taréjkapcsolat ellenállásának bizonytalansága [-] | 1.25 | 0.15 | lognormális | (JCSS, 2000) |
| jobboldali oszlop keresztmetszeti tényezőjének bizonytalansága [-] | 1 | 0.05 | normális | (JCSS, 2000) |
| baloldali gerenda keresztmetszeti tényezőjének bizonytalansága [-] | 1 | 0.05 | normális | (JCSS, 2000) |
| jobboldali gerenda keresztmetszeti tényezőjének bizonytalansága [-] | 1 | 0.05 | normális | (JCSS, 2000) |
| hatásoldali bizonytalansági tényező [-] | 1 | 0.15 | lognormális | |
| ellenállás oldali bizonytalansági tényező [-] | 1 | 0.2 | lognormális | |
| kifordulás miatti csökkentő tényező bizonytalansági tényező [-] | 1.15 | 0.1 | normális | (Nadolski and Sykora, 2015) |
| kihajlás miatti csökkentő tényező bizonytalansági tényező [-] | 1.15 | 0.1 | normális | (Nadolski and Sykora, 2015) |
| acélhőmérséklet bizonytalansága [-] | 1 | 0.3 | lognormális | (Balogh and Vigh, 2016a), (Boko et al., 2010) |

OZone tűzgörbe kétzónás tűzmodell alapján:



Optimális kialakítás vizsgálata – paraméteres vizsgálat:

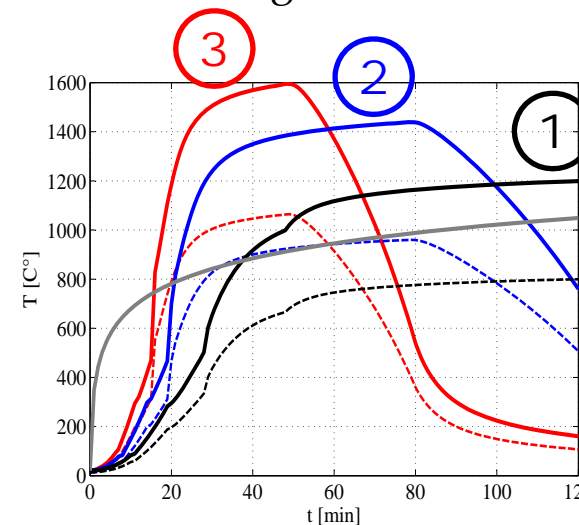
| Oszlop | | Gerenda | |
|------------|-------------------------------------|------------|--|
| $t_{w,c}$ | gerincvastagság | $t_{w,b}$ | gerincvastagság |
| $t_{f,c}$ | övvastagság | $t_{f,b}$ | övvastagság |
| b_c | övszélesség | b_b | övszélesség |
| h_{c1} | km. magassága oszloptalpnál | h_{b1} | km. magassága taréjnál |
| h_{c2} | km. magassága keretsaroknál | h_{b2} | km. magassága keretsaroknál |
| $t_{p,c1}$ | tűzvédelmi festék vtg. alul | $t_{p,b1}$ | tűzvédelmi festék vtg. nem változó km. |
| $t_{p,c2}$ | tűzvédelmi festék vtg. felül | $t_{p,b2}$ | tűzvédelmi festék vtg. változó km. |
| $t_{p,c}$ | tűzvédelmi festék vtg. kapcsolatnál | | |



Paraméteres vizsgálat - tűz:

| # | Követelmény | c_s [€/kg] | c_p [€/ (mm·m ²)] | C_2 [€/m ²] | Aktív tűzvédelem | C_f [m €] | Tűz- görbe | gépészet [kN/m ²] | |
|------------------------|-------------|-----------------|------------------------------------|------------------------------|---------------------|----------------|---------------|----------------------------------|-----|
| A – referencia-csoport | 1 | R30 | 2.25 | 24 | 40 | füstérzékelő | 3.0 | 1 | 0.2 |
| | 2 | R45 | 2.25 | 24 | 40 | füstérzékelő | 3.0 | 1 | 0.2 |
| | 3 | R60 | 2.25 | 24 | 40 | füstérzékelő | 3.0 | 1 | 0.2 |
| | 4 | R30 | 2.25 | 24 | 40 | füstérzékelő | 3.0 | 2 | 0.2 |
| | 5 | R45 | 2.25 | 24 | 40 | füstérzékelő | 3.0 | 2 | 0.2 |
| | 6 | R60 | 2.25 | 24 | 40 | füstérzékelő | 3.0 | 2 | 0.2 |
| | 7 | R30 | 2.25 | 24 | 40 | füstérzékelő | 3.0 | 3 | 0.2 |
| | 8 | R45 | 2.25 | 24 | 40 | füstérzékelő | 3.0 | 3 | 0.2 |
| | 9 | R60 | 2.25 | 24 | 40 | füstérzékelő | 3.0 | 3 | 0.2 |
| 10 | R30 | 2.25 | 24 | 40 | füstérzékelő | 3.0 | 1 | 0.5 | |
| 11 | R45 | 2.25 | 24 | 40 | füstérzékelő | 3.0 | 1 | 0.5 | |
| 12 | R60 | 2.25 | 24 | 40 | füstérzékelő | 3.0 | 1 | 0.5 | |
| B | 13 | R30 | 2.25 | 24 | 40 | füstérzékelő | 3.0 | 2 | 0.5 |
| | 14 | R45 | 2.25 | 24 | 40 | füstérzékelő | 3.0 | 2 | 0.5 |
| | 15 | R60 | 2.25 | 24 | 40 | füstérzékelő | 3.0 | 2 | 0.5 |
| | 16 | R30 | 2.25 | 24 | 40 | füstérzékelő | 3.0 | 3 | 0.5 |
| | 17 | R45 | 2.25 | 24 | 40 | füstérzékelő | 3.0 | 3 | 0.5 |
| | 18 | R60 | 2.25 | 24 | 40 | füstérzékelő | 3.0 | 3 | 0.5 |
| C | 19 | R30 | 2.25 | - | 40 | füstérzékelő | 3.0 | 1 | 0.2 |
| | 20 | R30 | 2.25 | - | 40 | füstérzékelő | 3.0 | 2 | 0.2 |
| | 21 | R30 | 2.25 | - | 40 | füstérzékelő | 3.0 | 3 | 0.2 |
| D | 22 | R45 | 2.25 | 24 | 40 | füstérzékelő | 30.0 | 1 | 0.2 |
| | 23 | R45 | 2.25 | 24 | 40 | füstérzékelő | 30.0 | 2 | 0.2 |
| | 24 | R45 | 2.25 | 24 | 40 | füstérzékelő | 30.0 | 3 | 0.2 |
| E | 25 | R45 | 2.25 | 24 | 40 | füstérzékelő | 0.3 | 1 | 0.2 |
| | 26 | R45 | 2.25 | 24 | 40 | füstérzékelő | 0.3 | 2 | 0.2 |
| | 27 | R45 | 2.25 | 24 | 40 | füstérzékelő | 0.3 | 3 | 0.2 |
| F ⁺ | 28 | R45 | 4.50 | 48 | 80 | füstérzékelő | 3.0 | 1 | 0.2 |
| | 29 | R45 | 4.50 | 48 | 80 | füstérzékelő | 3.0 | 2 | 0.2 |
| | 30 | R45 | 4.50 | 48 | 80 | füstérzékelő | 3.0 | 3 | 0.2 |
| G | 31 | R45 | 2.25 | 24 | - | - | 3.0 | 1 | 0.2 |
| | 32 | R45 | 2.25 | 24 | - | - | 3.0 | 2 | 0.2 |
| | 33 | R45 | 2.25 | 24 | - | - | 3.0 | 3 | 0.2 |
| H | 34 | R45 | 2.25 | 24 | 75 | sprinkler | 3.0 | 1 | 0.2 |
| | 35 | R45 | 2.25 | 24 | 75 | sprinkler | 3.0 | 2 | 0.2 |
| | 36 | R45 | 2.25 | 24 | 75 | sprinkler | 3.0 | 3 | 0.2 |

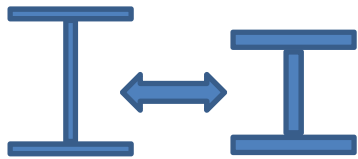
Ozone tűzgörbék:



R30, R45 és R60

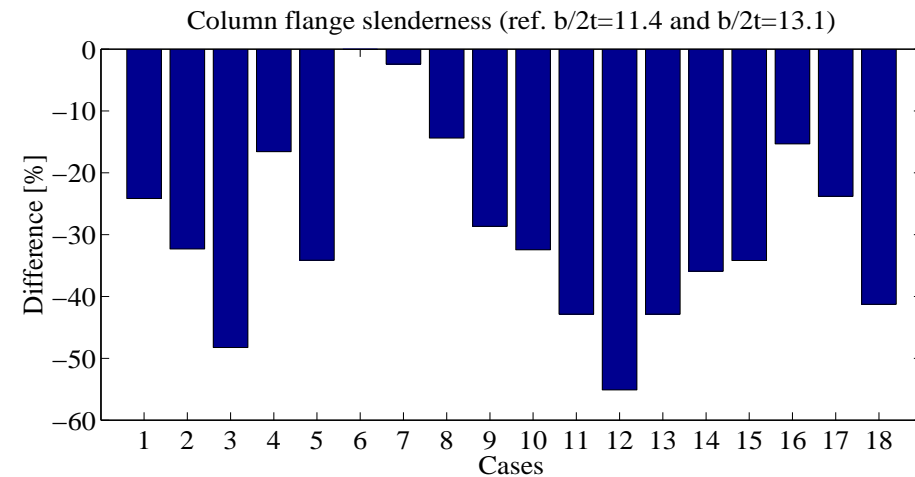
Paraméteres vizsgálat - tűz:

- Optimális keresztmetszetek - b/t arány: (összehasonlítás hagyományos terhekre optimált szerkezetekkel)

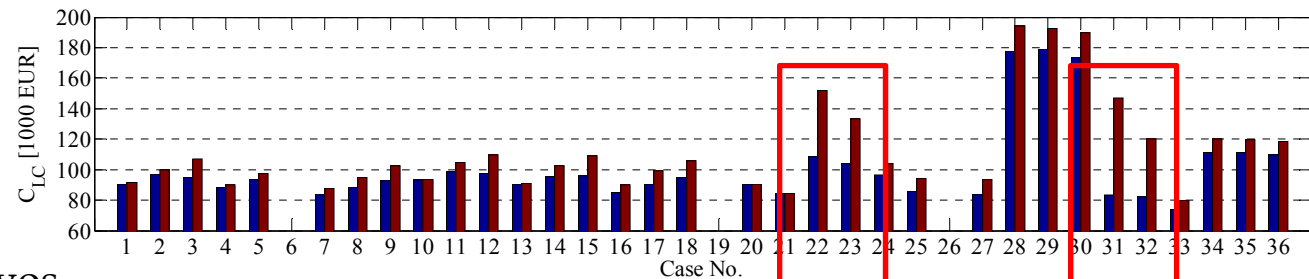


- kisebb A/V
- stabilitásvesztésre kevésbé érzékeny

Pl. oszlop övlemez:



- Életciklus költségek:



(összehasonlítás hagyományos terhekre optimált szerkezetekkel – tűzvédő festék vtg. jelenlegi gyakorlat szerint)

nagy C_{fr} illetve nagy $P_{flashover}$

Paraméteres vizsgálat - tűz:

- Megbízhatósági szint:

50 éves élettartam

| Megerősítés költsége | Tűzhatás | Csekély következmények | Mérsékelt következmények | Jelentős következmények |
|----------------------|-----------|------------------------|--------------------------|-------------------------|
| Magas | Súlyos | 2.8 (2.8)* | 2.8 – 3.2 (2.8 – 3.3) | 3.6 (3.7)* |
| Közepes | Mérsékelt | 2.8 (2.9)*† | 2.9 – 3.4 (3.0 – 3.5) | 3.6 (3.8)* |
| Alacsony | Gyenge | 2.9 (3.0)* | 3.1 – 3.5 (3.3 – 3.6) | 3.7 (3.8)* |

50 éves tervezési élettartam: MSZ EN 1990:2011

| Alacsony következmények (CC1) | Közepes következmények (CC2) | Jelentős következmények (CC3) |
|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| 3,3 | 3,8 | 4,3 |

50 éves tervezési élettartam: Probabilistic Model Code of JCSS (JCSS, 2000)

| Megerősítés költsége | Csekély következmények | Mérsékelt következmények | Jelentős következmények |
|----------------------|------------------------|--------------------------|-------------------------|
| Magas (A) | 1,67 | 1,98 | 2,55 |
| Közepes (B) | 2,55 | 3,21 | 3,46 |
| Alacsony (C) | 3,21 | 3,46 | 3,83 |

Élettartam: ISO 2394 (ISO 2394, 2015)

| Megerősítés költsége | Csekély következmények | Mérsékelt következmények | Jelentős következmények |
|----------------------|------------------------|--------------------------|-------------------------|
| Magas (A) | 1,5 | 2,3 | 3,1 |
| Közepes (B) | 2,3 | 3,1 | 3,8 |
| Alacsony (C) | 3,1 | 3,8 | 4,3 |

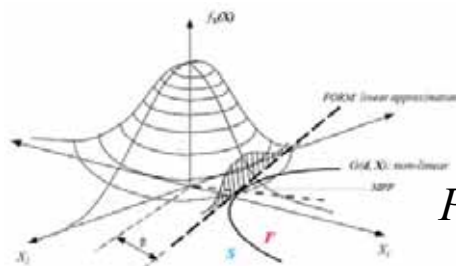
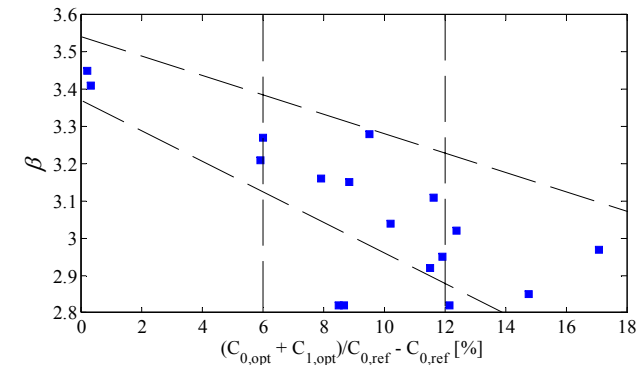


Figure 2. Illustration of the FORM approximation.

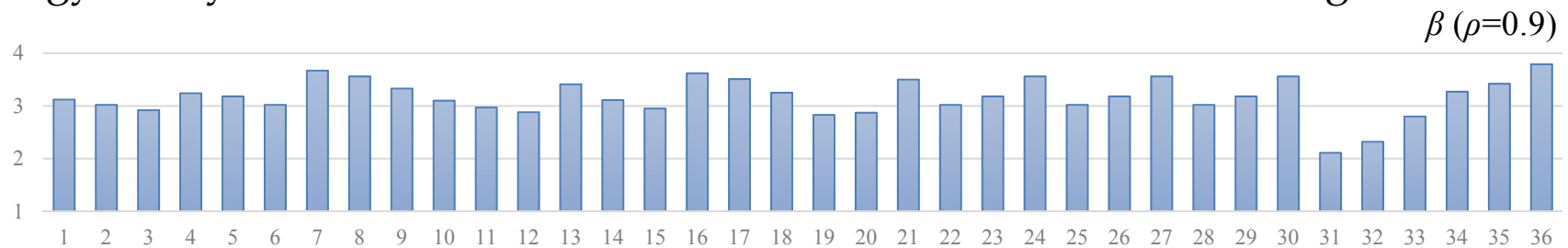
$$P_f = \Phi\left(-\frac{\mu}{\sigma}\right) = \Phi(-\beta)$$

A megbízhatósági index szórásának oka:

- a megbízhatósági index célértéke, illetve a gazdaságos biztonsági szint függ többek között az épületben tárolt éghető anyagok mennyiségétől és minőségétől.

Paraméteres vizsgálat - tűz:

- Hagyományosan méretezett szerkezetek tönkremeneteli valószínűsége:



Köszönöm a megtisztelő figyelmet!