

MŰSZAKI SZEMLE
71. szám, 2018.

Szerkesztőbizottság elnöke /
President of Editing Committee

Dr. Köllő Gábor

Szerkesztőbizottság tagjai /
Editing Committee

Dr. Balázs L. György – HU
Dr. Barabás István – RO
Dr. Biró Károly Ágoston – RO
Dr. Csibi Vencel-József – RO
Dr. Fedák László – UA
Dr. Karácsony János – RO
Dr. Kása Zoltán – RO
Dr. Kontra Jenő – HU
Dr. Majdik Kornélia – RO
Dr. Nagy László – RO
Dr. Péics Hajnalka – RS
Dr. Sebestyén-Pál György – RO
Dr. Szalay György – SK
Dr. Turchany Guy – CH
Dr. Zsuga Miklós – HU

Kiadja / Editor

Erdélyi Magyar Műszaki
Tudományos Társaság – EMT
Societatea Maghiară Tehnico-Științifică
din Transilvania
Ungarische Technisch-Wissenschaftliche
Gesellschaft in Siebenbürgen
Hungarian Technical Scientific Society
of Transylvania

Felelős kiadó / Managing Editor

Dr. Köllő Gábor

A szerkesztőség címe / Address

Romania
400604 Cluj, Kolozsvár
B-dul 21. Decembrie 1989., nr. 116.
Tel/fax: 40-264-590825, 594042
Levélcím: RO – 400750 Cluj, C.P. 1-140.

Nyomda / Printing

Incitato Kft.

ISSN 1454-0746

www.emt.ro

emt@emt.ro

Tartalomjegyzék – Content – Cuprins

Egy gyalogos felüljáró üreges szerkezettel készült
acél–beton kompozit tartójának elemzése rugalmas
és rugalmas–képlékeny állapotban

Composite Steel-concrete Girders with Circular Holes
Elastic and Elastic-Plastic Design

Analiza rezistenței în domeniul elastic și plastic
a unei pasarele pietonale pe grinzi compozite

Dr. Călin MOGA, Dr. Crina FENEȘAN

3

A sín hajlítónyomatékának számítása
figyelembe véve a talpaljak ellenállását

Calculation of the Bending Moment
in the Rail Track Taking Into Account the Sleepers Reactions

Calculul momentului încovoietor din șină
în funcție de reacțiunile traverselor

Dr. KÖLLŐ Gábor, TAKÁCS Timea

13

Öszvérszerkezetű hidak
Rövid történelmi kronológia – II. rész

Steel-concrete composite bridges
Short historical chronology – part II.

Poduri cu structură mixtă oțel-beton
Scurtă cronologie istorică – partea II.

MOLNÁR Lajos

17

Alacsony-és magas nyomású kipufogógáz visszavezetés
hatásvizsgálata haszonjármű dízelmotoron

Combinated Low and High Pressure Exhaust Gas Recirculation Impact
Assessment on a Medium Duty Diesel Engine

Cercetări privind efectele recirculării gazelor de evacuare la joasă
și la înaltă presiune în cazul unui motor Diesel ce echipează autoutilitare

NYERGES Ádám, Dr. ZÖLDY Máté

31

Egy gyalogos felüljáró üreges szerkezettel készült acél–beton kompozit tartójának elemzése rugalmas és rugalmas–képlékeny állapotban

Composite Steel-concrete Girders with Circular Holes Elastic and Elastic-Plastic Design

Analiza rezistenței în domeniul elastic și plastic a unei pasarele pietonale pe grinzi compozite

Dr. Călin MOGA, Dr. Crina FENEȘAN

Kolozsvári Műszaki Egyetem

ABSTRACT

In this paper some aspects concerning the design of steel-concrete composite structures are presented. The steel girders are built-up as rolled sections with circular holes in webs. This paper presents an adaptation of Euro norms EN 1994-1-1:2004. Eurocode 4 - Design of composite and concrete structures – Part 1-1: General rules for buildings and EN 1994-2:2004. Eurocode 4 - Design of composite and concrete structures – Part 2: General rules and rules for bridges to the design of composite steel-concrete girders with circular holes.

Key words: composite girders, rolled sections with circular holes, Euro codes.

1. BEVEZETŐ

Az alábbi dolgozatban egy gyalogos átjáró kompozit tartójának végső ellenállást összehasonlító elemzését mutatjuk be.

Az acéltartók gerinclemezei üreges szerkezettel, az övlemezek hengerelt szelvényekből, nem szimmetrikus övlemezzel készültek.

Az analízisek elméleti megközelítése a európai szabványrendszerek kompozit tartókra vonatkozó tervezési rendszerére támaszkodik. Felhasznált szabványok SR EN 1994-1-1: 2006; Eurocod 4: Acél és beton kompozit szerkezetek tervezése.

A tartó nyomatóki szilárdságának meghatározása a kompozit keresztmetszet rugalmas és rugalmas – képlékeny állapotában történik, az acéltartó keresztmetszetének osztálybesorolása függvényében.

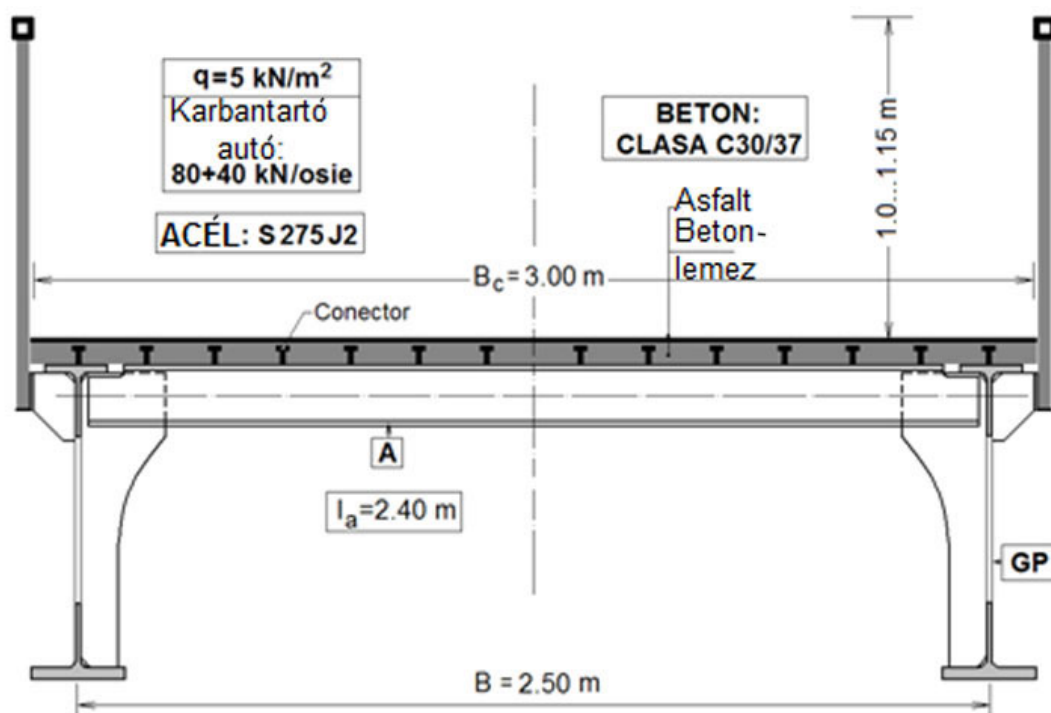
2. A TARTÓ TERVEZÉSE

*Felüljáró kompozit acél-beton szerkezettel
Aszimmetrikus acéltartók üreges kialakítással*

2.1. Rugalmas állapotban való elemzés

Egy gyalogos felüljáró kompozit tartójának alapvető számolását mutatjuk be ismerve, a következő adatokat:

- a szerkezet nyitása: $L = 24.0$ m; hasznos szélessége: $B_c = 3.00$ m;
- a felüljáró felszerkezete kompozit szerkezetű két acél tartóra támaszkodik, a keresztartók közötti távolság $l_a = 2.40$ m, amelyek összedolgoznak a monolit szerkezetű vasbeton lemezzel, 1. ábra;
- Az acéltartók hengerelt szelvényekből készülnek, üreges kialakítással a gerinclemezüknön. Két típusú laminált szelvény összehegesztéséből alakítják ki.
- A főtartók acéltípusa: S 275 J2;
- a monolit vasbeton lemez betontosztálya: Clasa 30/37.



1. ábra
A felüljáró felszerkezetének keresztmetszete

ERŐHATÁSOK

A betonlemez aktív (hasznos) szélessége: $b_{eff} = 150 \text{ cm}$

Ekvivalencia együttható:

30/37-es betonosztály esetén, $E_{cm} = 33 \text{ GPa}$, $n_0 = 6.36$.

Az így kapott együttható értéke a következő: $n = 2 \cdot n_0 = 2 \cdot 6.36 = 12.72$

A. ÁLLANDÓ ÉS HASZNOS TERHEK ESETÉN

1. Fázis (Az egy méterre jutó terhelés nagysága):

Az 1-es fázisban az állandó terhek nagysága: $g_t = 14.4 \text{ kN/m}$.

Következik: $M_{g1} = \frac{g_1 \cdot L^2}{8} = \frac{7.2 \cdot 24^2}{8} \approx 518 \text{ kN} \cdot \text{m}$; $V_{g1} = \frac{g_1 \cdot L}{2} = \frac{7.2 \cdot 24}{2} \approx 86 \text{ kN}$

2. Fázis (Az egy méterre jutó terhelés nagysága):

Az 1-es fázisban megjelenő egyéb, állandó terhek nagysága: $g_{i2} = 3.7 \text{ kN/m}$

Egy gerendára jutó állandó teher (kiegészítő) nagysága: $g_2 \approx 2 \text{ kN/m}$

Következik: $M_{g2} = \frac{g_2 \cdot L^2}{8} = \frac{2 \cdot 24^2}{8} = 144 \text{ kN} \cdot \text{m}$;

A gyalogosok által gerjesztett hasznos teher: $3 \times 500 \text{ daN/m}^2 = 15 \text{ kN/m}$ $V_{g2} = \frac{g_2 \cdot L}{2} = \frac{2 \cdot 24}{2} = 24 \text{ kN}$

Egy tartóra jutó hasznos teher: $p = p_t / 2 = 1500 / 2 = 750 \text{ daN} / \text{m} = 7.5 \text{ kN/m}$.

Következik: $M_p = 540 \text{ kN} \cdot \text{m}$; $V_p = 90 \text{ kN}$

B. JÁRMŰ ÁLTAL GERJESZTETT TERHEK NAGYSÁGA

Az így kapott értékek a következők: $M_v = 330 \text{ kN}\cdot\text{m}$; $V_v = 57,5 \text{ kN}$

C. SZÉLTEHER ($w = 2.3 \text{ kN} / \text{m}^2$)

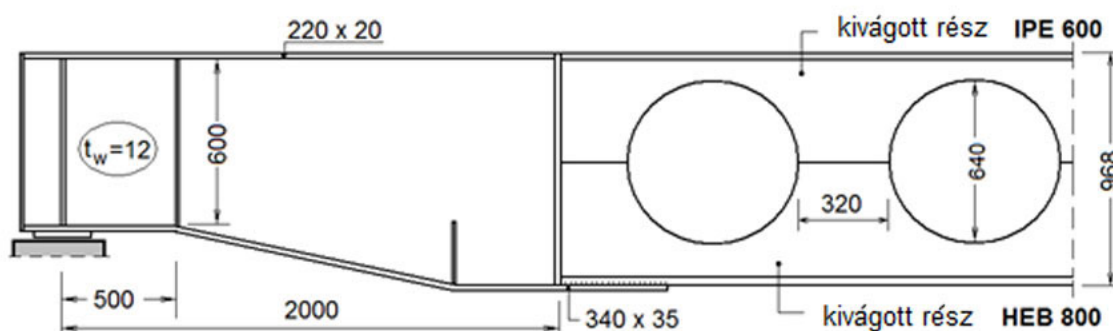
A szél direkt terhelését, a tartók felső övlemeze fölött elhelyezett betonlemez veszi át, amely a vízszintes szélrácsok szerepét is betölti.

A szélteher közvetlen hatása által előidézett hajlító nyomaték: $M_{w.ind} = 130 \text{ kN}\cdot\text{m}$

A szélteher közvetlen hatása által előidézett nyíróerő: $V_{w.ind} = 21.6 \text{ kN}$

A főtartók ellenőrzése

Az acél főtartókat a gerinclemezen megjelenő üreges kialakítással szerelik be, amint az a 2-es ábrán látható:



2. ábra

A főtartók tervezése a következő viselkedési feltevések alapján történik:

1. FELTEVÉS

Az üreges tartók viselkedése a tömör keresztmetszettel készült tartókéhoz hasonló (az üregek mentén a hiányzó anyagmennyiséget nem vesszük figyelembe)

A normálfeszültségek követik a Navier és Bernoulli félé elméleteket.

1. Fázis: Az acéltartó nem dolgozik együtt a betonlemezzel

Az acéltartó jellemzőit, az üreges kialakítások vonalában a 3-as ábrán mutatjuk be:

Lévé, hogy a tartó keresztmetszeti osztálybesorolása 1-es, a képlékeny osztályban végezzük el a számításokat.

A tartó keresztmetszetének hajlítási szilárdsága:

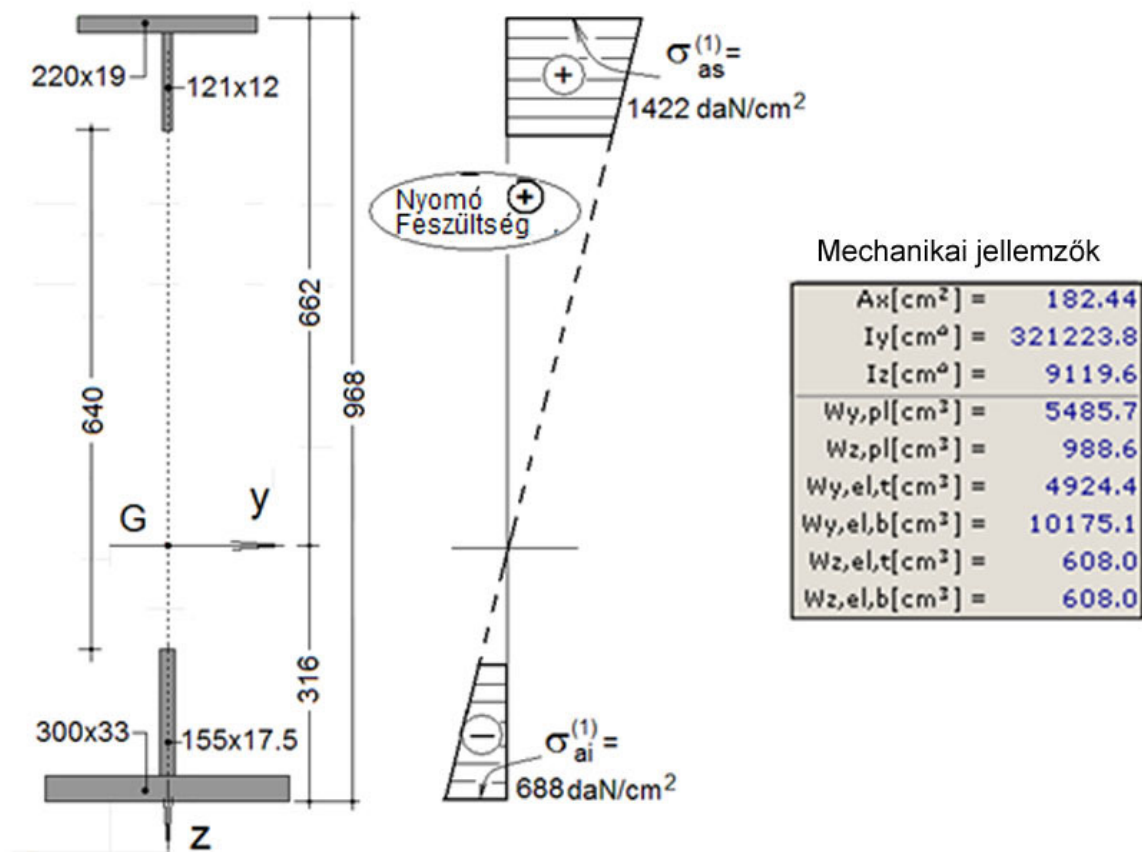
$$M_{c.Rd}^{Otel} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{5485.7 \cdot 2750}{1.0} 10^{-4} = 1508 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Az 1-es fázisban a tartó hajlító nyomatékának tervezési értéke:

$$M_{Ed}^{F1} = \gamma_G \cdot M_{g1} = 1.35 \cdot 518 = 700 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$\frac{M_{Ed}^{F1}}{M_{c.Rd}^{Otel}} < 1$$

Az összeszerelés idején kell ellenőrizni a tartók általános stabilitását, illetve a nyomott öv kifordulási esélyeit (lásd a számolásokat a 2-ik feltevésben).



3. ábra

A normálfeszültségek értékei a külső szálakban, övlemezekben a következők:

– az alsó szálban:

$$\sigma_{ai}^{(1)} = \frac{M_{Ed}^{F1}}{W_{y,el,b}} = \frac{700 \cdot 10^4}{10175} = 688 \text{ daN / cm}^2$$

– a felső szálban:

$$\sigma_{as}^{(1)} = \frac{M_{Ed}^{F1}}{W_{y,el,t}} = \frac{700 \cdot 10^4}{4924} = 1422 \text{ daN / cm}^2$$

2. Fázis: Az acéltartó együtt dolgozik a betonlemezzel

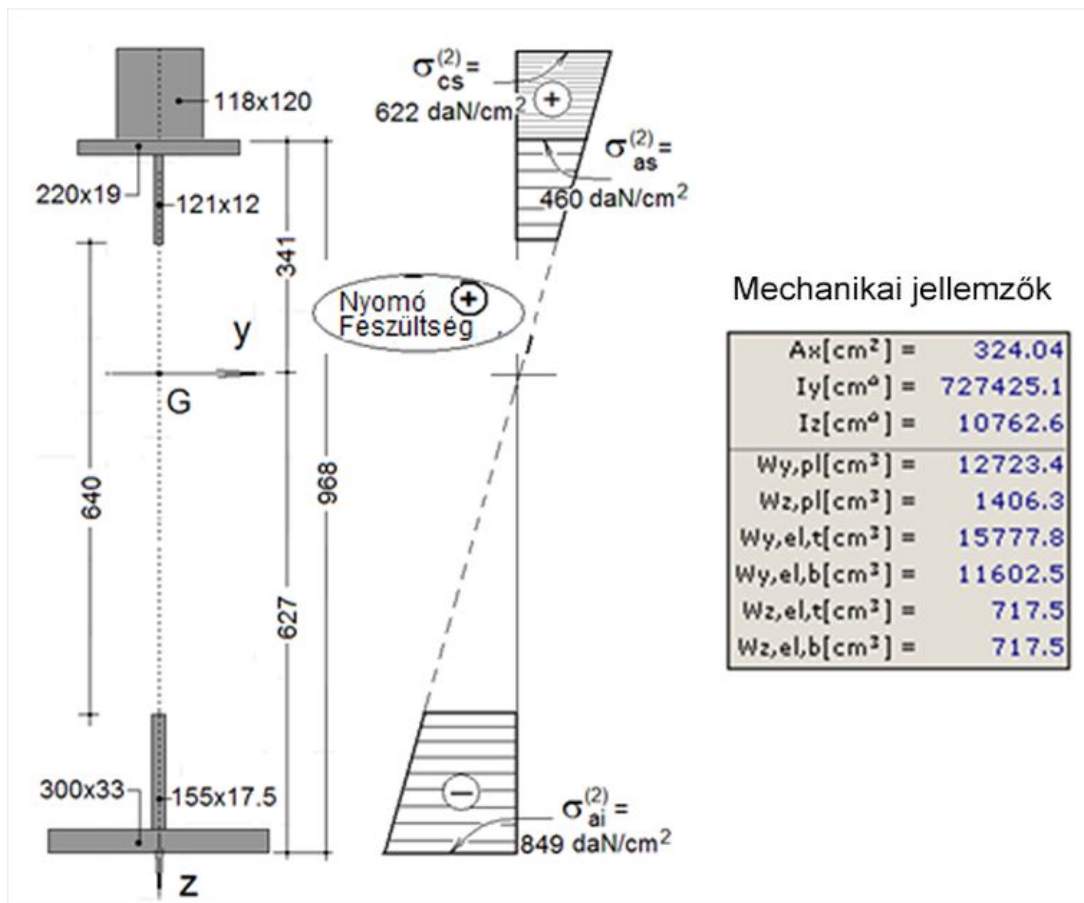
A 2. fázisban az acéltartó szerkezetiileg együtt dolgozik a betonlemezzel, a kapcsolóelemek által, amelyek megakadályozzák a szerkezeti elemek egymáshoz viszonyított elcsúszását.

A betonlemez acéllal kiegyenlített szélessége: $b_{eff}^* = 118 \text{ mm}$.

A kompozit acéltartó jellemzőit az 4-es ábrán mutatjuk be:

A hajlító nyomaték számítási értékét a 2-es fázisban az egyes teherkombináció segítségével határoztuk meg (a gyalogosok által okozott hasznos teher).

$$M_{Ed}^{F2} = \gamma_G \cdot M_{g2} + \gamma_{Q1} \cdot M_p + \psi_{0,w} \cdot \gamma_w \cdot M_{w,ind} = 982 \text{ kN} \cdot \text{m}$$



4. ábra

Az egységnyi normálfeszültségek nagysága a külső övlemezben az acéltartó és betonlemez esetén a következők (4. ábra):

- Az acéltartó alsó szálában:

$$\sigma_{ai}^{(2)} = \frac{M_{Ed}^{F2}}{W_{y,el,b}^{compus}} = \frac{982 \cdot 10^4}{11602.5} = 849 \text{ daN/cm}^2$$

- A felső szálban:

$$\sigma_{as}^{(2)} = \frac{M_{Ed}^{F2}}{I_{y,el}^{compus}} z_s = \frac{982 \cdot 10^4}{727425} \cdot 34.1 = 460 \text{ daN/cm}^2$$

- A betonlemez felső szálában (acéllal kiegyenlítve):

$$\sigma_{cs}^{(2)} = \frac{M_{Ed}^{F2}}{W_{y,el,t}^{compus}} = \frac{982 \cdot 10^4}{15777.8} = 622 \text{ daN/cm}^2$$

A normálfeszültségek végleges értékei az acéltartó és a betonlemez külső szálaiban a következők:

- az acéltartó alsó szálában:

$$\sigma_{ai} = \sigma_{ai}^{(1)} + \sigma_{ai}^{(2)} = 688 + 849 = 1537 \text{ daN/cm}^2 < \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{2750}{1.0} = 2750 \text{ daN/cm}^2$$

- az acéltartó felső szálában:

$$\sigma_{as} = \sigma_{as}^{(1)} + \sigma_{as}^{(2)} = 1422 + 460 = 1882 \text{ daN/cm}^2 < \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 2750 \text{ daN/cm}^2$$

- A betonlemez felső szálában (acéllal kiegyenlítve):

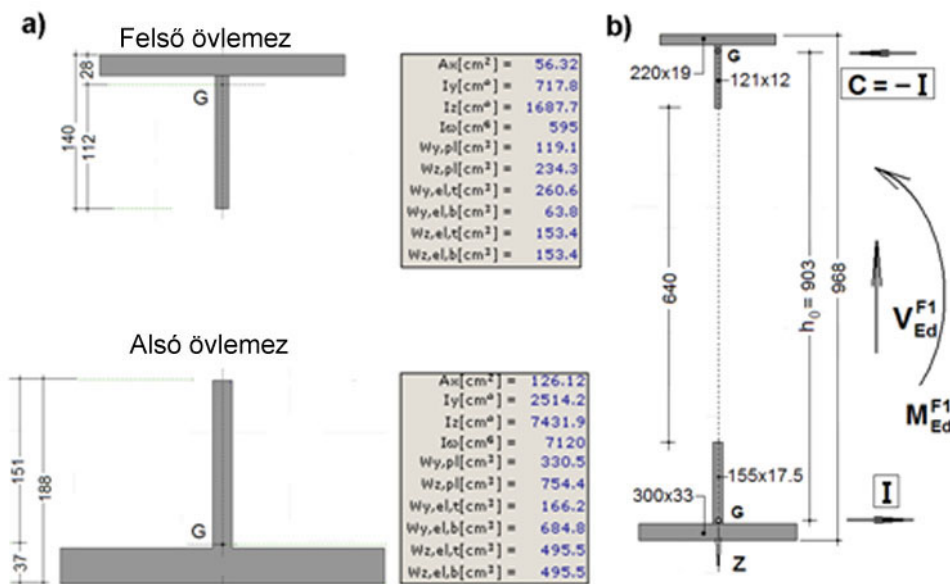
$$\sigma_{cs} = \sigma_{cs}^{(2)} = 622 \text{ daN/cm}^2 < n \cdot \frac{0.85 \cdot f_{ck}}{\gamma_c} = 12.72 \cdot \frac{0.85 \cdot 300}{1.5} = 2162 \text{ daN/cm}^2$$

2. FELTEVÉS

Az üregesen készült tartók viselkedése az üregek irányában hasonló a rácsos tartók viselkedésével. Az övlemezekben megjelenő tengelyirányú erőket az M/h_0 képlettel határozzuk meg.

1. Fázis: Az acéltartó nem dolgozik együtt a betonlemezzel

Az 5. ábrán a felső és alsó övlemezek ellenállási tulajdonságai mutatjuk be.



5. ábra

$$\text{Ellenőrzés: } \frac{N_{0.Ed}^{F1}}{N_{b.Rd}} \leq 1.0$$

Általában a keresztmetszet övlemeze 3-as osztály besorolású, és A_0 -val jelöljük a nyomott öv keresztmetszetét:

$$\text{Következik: } N_{b.Rd} = \chi_{LT} \frac{A_0 \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$$

A csökkentési tényező χ_{LT} figyelembe veszi a nyomott öv stabilitásvesztésének lehetőségét, oldal irányú kihajlás révén az 1-es fázisban, és a síkbeli karcsúság együtthatójának, $\bar{\lambda}$ függvényében határozza meg az értékét:

$$\bar{\lambda} = \bar{\lambda}_{LT} = \bar{\lambda}_{TF} = \sqrt{\frac{A_0 \cdot f_y}{N_{0.cr.TF}}} \Rightarrow \chi \text{ (görbe d).}$$

A stabilitásvesztést előidéző kritikus teher nagysága a következő:

$$N_{0.cr.TF} = \frac{I_{0,0}}{2(I_{0,y} + I_{0,z})} \left[(N_{0.cr,z} + N_{0.cr,T}) - \sqrt{(N_{0.cr,z} + N_{0.cr,T})^2 - 4 \frac{(I_{0,y} + I_{0,z})}{I_{0,0}} N_{0.cr,z} N_{0.cr,T}} \right],$$

$$\text{ahol: } N_{0.cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{0,z}}{L_{cr,z}^2}; N_{0.cr,T} = \frac{A_0}{I_{0,0}} \left(G \cdot I_{0,t} + \frac{\pi^2 E I_{0,\omega}}{L_{cr,T}^2} \right); I_{0,0} = I_{0,y} + I_{0,z} + A_0 \cdot z_s^2.$$

Lévéen, hogy az analízisben figyelembe veszik, hogy a keresztmetszet beszereléséig, meg van akadályozva a kivitelezési munkák során a stabilitásvesztés lehetősége, a kritikus hossz nagysága a keresztmetszet közötti távolsággal lesz egyenlő: $L_{cr,z} = 2.40 \text{ m}$

Így: $I_{0,0} = 2588 \text{ cm}^4$; $I_{0,t} = 57.3 \text{ cm}^4$; $N_{0,cr,z} = 0.607 \cdot 10^6 \text{ daN}$; $N_{0,cr,T} = 1.01 \cdot 10^6 \text{ daN}$; $N_{0,cr,TF} = 5500 \text{ kN}$;
 $\bar{\lambda}_{LT} = 0.53 \Rightarrow \chi_{LT} = 0.76$; $N_{b,Rd} = 1070 \text{ kN}$; $N_{0,Ed}^{F1} = 775 \text{ kN}$

Következik: $\frac{N_{0,Ed}^{F1}}{N_{b,Rd}} = \frac{775}{1070} = 0.72 < 1.0$ – teljesül a mellékelt feltétel.

2. Fázis: Az acéltartó együtt dolgozik a betonlemezzel

A 2. fázisban az acéltartó szerkezetiileg együtt dolgozik a betonlemezzel a kapcsolóelemek által, amelyek megakadályozzák a szerkezeti elemek (acél-beton) egymáshoz viszonyított elcsúszását.

A betonlemez acéllal kiegyenlített szélessége: $b_{\text{eff}}^* = 118 \text{ mm}$.

Ebben a munkafázisban, amikor a beton megszilárdult, nem jelentkezik a acéltartó felső övlemezének stabilitásvesztési lehetősége mivel a betonlemez megakadályozza annak kialakulását.

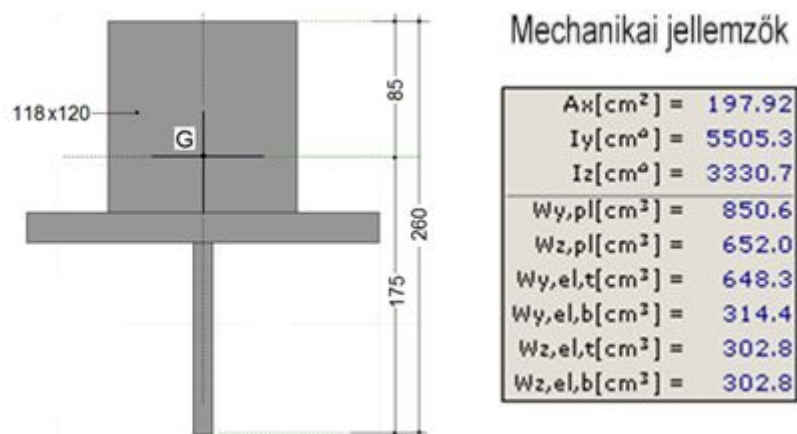
Lévén, hogy az 1-es fázisban, mindkét övlemez tengely irányú erők hatása alatt áll, a tartó végső ellenállásának nagyságát az övlemezeken ellenállási értékei közül a legkisebb adja.

Így figyelembe kell venni azt a tényt is, hogy az övlemezeken végső ellenállása csökkent az 1-es fázisban történő munkálatok során.

A 6-os ábrán a felső és alsó öv ellenállási jellemzőit mutatjuk be:

A 2-es fázisban az övlemezeken megjelenő tengely irányú erők:

$$N_{0,Ed}^{F2} = \frac{M_{Ed}^{F2}}{h_{0,2}} = \frac{982}{0.966} = 1016 \text{ kN}$$



6. ábra

Az alsó övlemez ellenőrzése a következő képlettel történik:

$$\frac{N_{0,Ed}^{F1} + N_{0,Ed}^{F2}}{N_{c,Rd}^{T,inf.}} \leq 1$$

A húzott öv ellenállása:

$$N_{c,Rd}^{T,inf.} = \frac{A_{Tl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{126.12 \cdot 2750}{1.0} 10^{-2} = 3468 \text{ kN}$$

$$\text{Így: } \frac{N_{0,Ed}^{F1} + N_{0,Ed}^{F2}}{N_{c,Rd}^{T,inf.}} = \frac{775 + 1016}{3468} = 0.52 < 1$$

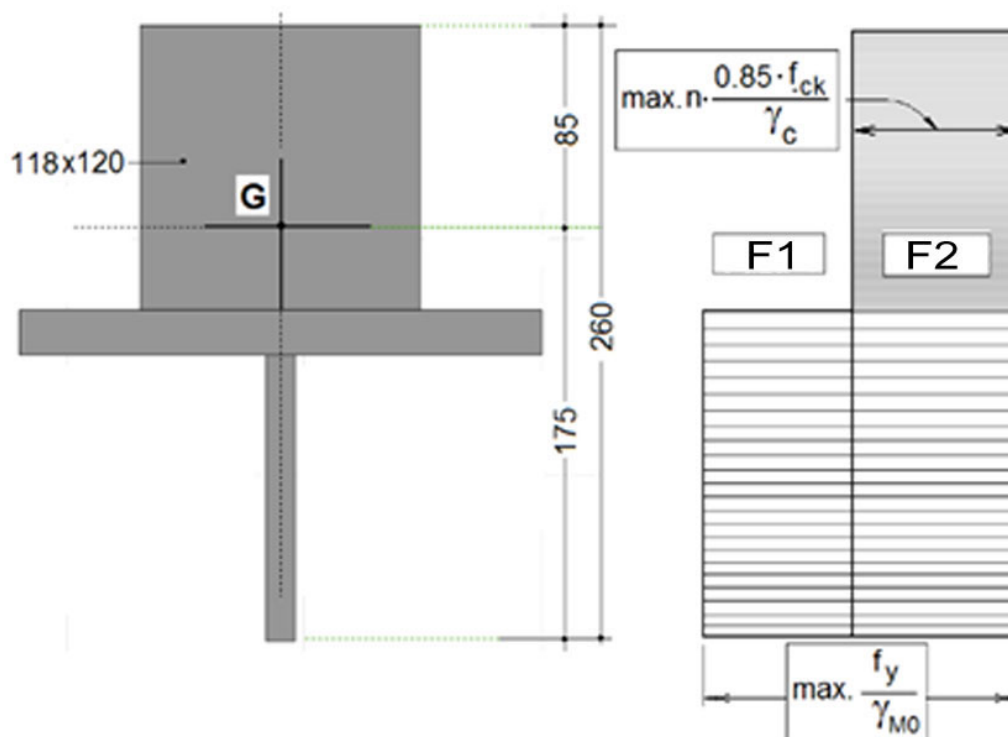
$$\text{vagy: } \sigma_a = \frac{N_{0,Ed}^{F1} + N_{0,Ed}^{F2}}{A_{Tl}} = \frac{1791 \cdot 10^2}{126.12} = 1420 \text{ daN / cm}^2 < \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 2750 \text{ daN / cm}^2$$

– az acélban:

$$\sigma_a = \frac{N_{0.Ed}^{F1}}{\chi_{LT} \cdot A_{TS}^{Otel}} + \frac{N_{0.Ed}^{F2}}{A_{TS}^{Total}} = \frac{775 \cdot 10^2}{0.76 \cdot 56.32} + \frac{1016 \cdot 10^2}{197.92} = 2324 \text{ daN/cm}^2 < \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 2750 \text{ daN/cm}^2$$

– az acéllal kiegyenlített betonban:

$$\sigma_c = \frac{N_{0.Ed}^{F2}}{A_{TS}^{Total}} = \frac{1016 \cdot 10^2}{197.92} = 513 \text{ daN/cm}^2 < n \frac{0.85 \cdot f_{ck}}{\gamma_c} = 12.72 \frac{0.85 \cdot 300}{1.5} = 2162 \text{ daN/cm}^2$$



7. ábra

Ha nem vesszük figyelembe a csökkentési tényezőt, χ_{LT} , az acél övlemezben az egységnyi feszültségek nagysága: $\sigma_a = 1890 \text{ daN/cm}^2$.

Az 1-es táblázat a két különböző elemzési módszerrel és feltevéssel kiszámolt feszültségek közötti összehasonlítást mutatja be.

1. táblázat

| egységnyi feszültség | 1. változat [daN/cm ²] | 2. változat [daN/cm ²] | $\frac{\sigma \text{ módszer 1}}{\sigma \text{ módszer 2}}$ |
|----------------------|------------------------------------|------------------------------------|---|
| Alsó övlemez | 1537 | 1420 | 1.08 |
| Felső övlemez | 1882 | 1890 | 0.99* |
| Betonlemez | 622/n | 513/n | 1.21 |

* nem véve figyelembe χ_{LT} -t

2.2. Képlékeny állapotban való számolás

Azt a feltevést vesszük figyelembe, amikor az üregesen készült tartók viselkedése hasonló az üregek irányában a rácsos tartókként értelmezett tartók övlemezeinek viselkedésével. A tengely irányú erőket az M/h_0 képlettel határozzák meg.

1. Fázis: Az acéltartó nem dolgozik együtt a betonlemezzel (hasonló a 2-es feltevással, rugalmas állapotban való számolásnál)

A csökkentési tényező értéke $\chi_{LT} = 0.76$, amely által figyelembe veszi a nyomott övlemez stabilitásvesztésének lehetőségét, hajlítás-csavarás által előidézett kihajlásokon keresztül.

– felső övlemez

$$\sigma_{a.s}^{F1} = \frac{N_{0.Ed}^{F1}}{\chi_{LT} \cdot A_{TS}^{Orel}} = \frac{775 \cdot 10^2}{0.76 \cdot 56.32} = 1811 \text{ daN} / \text{cm}^2$$

– alsó övlemez:

$$\sigma_{a.i}^{F1} = \frac{N_{0.Ed}^{F1}}{A_{TI}} = \frac{775 \cdot 10^2}{126.12} = 614 \text{ daN} / \text{cm}^2$$

2. Fázis: Az acéltartó együtt dolgozik a betonlemezzel

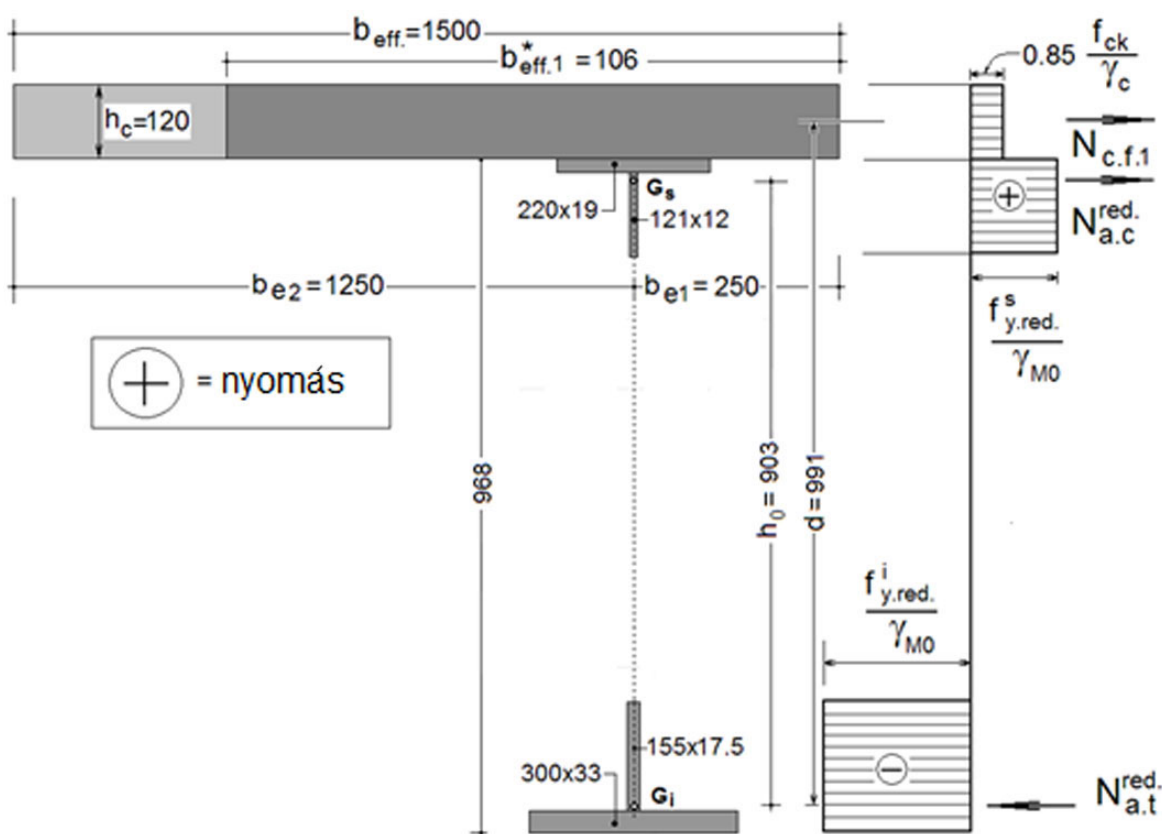
A 2. fázisban az acéltartó szerkezetiileg együtt dolgozik a betonlemezzel a kapcsolóelemek által, amelyek megakadályozzák a szerkezeti elemek (acél-beton) egymáshoz viszonyított elcsúszását.

Az acéltartó végső ellenállásának mértékét a képlékeny határállapot elérésekor lehet meghatározni.

Lévéen, hogy az 1-es fázisban mindkét övlemez tengely irányú erők hatása alatt áll, a tartó végső ellenállásának nagyságát az övlemezek ellenállási értékei közül a legkisebb adja.

Így figyelembe kell venni azt a tényt is, hogy az övlemezek végső ellenállása csökkent az 1-es fázisban történő munkálatok során.

A kompozit, acél-beton tartó hajlítás ellenállásának meghatározásához a 8-as ábrán megfigyelhető számítási modellt használják:



8. ábra

Az acéltartó övlemezeiben megjelenő legnagyobb egységnyi normál feszültségeket az 1-es fázisban megjelenő feszültségek függvényében határozzák meg:

$$f_{y,red.}^s = f_y - \sigma_{a.s}^{F1} = 2750 - 1811 = 939 \text{ daN} / \text{cm}^2; \quad f_{yd}^s = \frac{f_{y,red.}^s}{\gamma_{M0}} = \frac{939}{1.0} = 939 \text{ daN} / \text{cm}^2$$

$$f_{y.red.}^i = f_y - \sigma_{ai}^{F1} = 2750 - 614 = 2136 \text{ daN / cm}^2; \quad f_{yd}^i = \frac{f_{y.red.}^i}{\gamma_{M0}} = \frac{2136}{1.0} = 2136 \text{ daN / cm}^2$$

$$N_{c.f.1} = A_{c.1} \cdot 0.85 \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 12 \cdot b_{eff.1}^* \cdot 0.85 \frac{300}{1.5} = 2040 \cdot b_{eff.1}^* \text{ daN}$$

$$N_{a.c}^{red.} = A_{TS} \cdot f_{yd}^s = 528.84 \text{ kN}; \quad N_{a.t}^{red.} = A_{TI} \cdot f_{yd}^i = 2693.92 \text{ kN}$$

A betonlemez aktív szélességét az eredő erők vízszintes tengelyre történő levetítéséből számolják

$$N_{c.f.1} + N_{a.c}^{red.} = N_{a.t}^{red.} \Rightarrow b_{eff.1}^* \approx 106 \text{ cm} < b_{eff}; \quad N_{c.f.1} = 2162.4 \text{ kN}$$

Ellenőrzés hajlítónyomatékra

$$M_{pl.Rd}^{red.} = N_{c.f.1} \cdot d + N_{a.c}^{red.} \cdot h_0 = 2620 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\frac{M_{Ed}^{F1}}{M_{y.pl}^{Otel}} + \frac{M_{Ed}^{F2}}{M_{pl.Rd}^{red.}} = \frac{700}{1509} + \frac{982}{2620} = 0.83 < 1$$

$$\text{ahol: } M_{y.pl}^{Otel} = W_{y.pl}^{Otel} \cdot f_{yd} = (5486 \cdot 2750 / 1.00) \cdot 10^{-4} = 1509 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

3. KÖVETKEZTETÉSEK

Az elvégzett számítások bemutatása után az alábbi következtetéseket vonhatjuk le:

- A rugalmas állapotban kapott eredmények, (a két számítási feltevésben) nagyon közeliek. A tartó leterheltsége nagyjából a végső ellenállásának a 70%-a (ULS).
- A képlékeny határállapotban történő számítások alapján a tartó leterheltsége nagyjából 50%-a végső ellenállásának (ULS).
- A képlékeny állapotban végzett számítások alapján körülbelül 20%-os (szilárdságú) ellenállási tartalék van a tartóban a rugalmas állapotú ellenőrzésekhez képest.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] FENEŞAN, Crina, MOGA, C.: *Composite steel-concrete girders with circular holes*. Buletinul Univ. Tehnice „Gh. Asachi”. Tome LXI(LXV). Fascicle 1. Iaşi, 2015
- [2] GUŢIU, I. Şt., MOGA, C.: *Structuri compuse oţel-beton*. UT PRESS. 2014
- [3] MOGA, C., FENEŞAN, Crina: *Plastic Analysis of Composite girders with circular holes*. Buletinul Univ. Tehnice „Gh. Asachi”. Tome LXI(LXV). Fascicle 1. Iaşi, 2015
- [4] MOGA, C., FENEŞAN, Crina: *Rezistenţa grinzilor cu goluri circulare compozite oţel-beton*. Conferinţa de Construcţii metalice. Cluj-Napoca. 2015
- [5] MOGA, P.: *Pasarele pietonale metalice. Baza de calcul*. UT PRESS. 2014
- [6] MOGA, P., GUTIU, I. Şt., MOGA, C., DANCIU, A., SUCIU, M.: *Pasarele pietonale metalice. Manual de proiectare*. 2014
- [7] MOGA, P., GUŢIU ŞT., MOGA.C.: *Elemente structurale din oţel*. UT PRESS. 2014
- [8] *** SR EN 1993-1-1/2006. Eurocod 3: *Proiectarea structurilor de oţel Partea 1-1: Reguli generale şi reguli pentru clădiri*.
- [9] *** SR EN 1994-1-1/2006. Eurocod 4 : *Proiectarea structurilor compozite de oţel şi beton. Partea 1-1: Reguli generale şi reguli pentru clădiri*.
- [10] *** SR EN 1994-2/2006. Eurocod 4 : *Proiectarea structurilor compozite de oţel şi beton. Partea 2: Reguli generale şi reguli pentru poduri*.
- [11] *** *European Steel Design Education Programme. ESDEP*. The ESDEP Society

A sín hajlítónyomatékanak számítása figyelembe véve a talpaljak ellenállását

Calculation of the Bending Moment in the Rail Track Taking Into Account the Sleepers Reactions

Calculul momentului încovoietor din șină în funcție de reacțiunile traverselor

Dr. KÖLLŐ Gábor, TAKÁCS Tímea

Kolozsvári Műszaki Egyetem

ABSTRAC

The paper presents the method to determine rail bending moment using sleepers reactions

ÖSSZEFOGLALÓ

Ez a tanulmány a vasúti sín hajlítónyomatékának a meghatározását mutatja be a keresztaljak reakciójának a függvényében.

Kulcsszavak: sín, igénybevétel, keresztalj, reakció

1. BEVEZETÉS

A vasúti sín számítása, vagyis a vasúti sín igénybevételének meghatározása egy olyan kérdést jelent, amely több mint 175 éve foglalkoztatja a mérnököket, de elmondható, hogy még a mai napig sem sikerült találni egy biztos módszert arra, hogy pontosan meg lehessen határozni az elem (sín) normál- és nyíró-feszültségeit.

Figyelembe véve a szakirodalmat, sok olyan számítási módszert találunk, amelyek nagyobb vagy kisebb pontossággal meghatározzák a sínben keletkező feszültségeket, ellenben a pontosságuk mindig az elfogadott számítási modelltől függ.

Tudjuk, hogy a sín típus meghatározása számos (paraméter) elemtől függ, amelyeket figyelembe kell venni. Megalkotni egy olyan számítási modellt, amely figyelembe veszi az összes elemet, gyakorlatilag lehetetlen. Ezért vannak olyan modellek, amelyek a számítások szempontjából kényelmesek, és amelyek a valósághoz közelítő megfelelő megoldásokat kínálnak.

Az a módszer, amely legközelebbi reális számítás lehetőségét kínálja, a Zimmermann–Eisenmann módszer, más szóval a fiktív gerendák vagy a helyettesítő gerendák módszere. Ez a módszer figyelembe veszi a sín fekvési módját a jelentősen széles talpaljakra (28-30 cm), talpaljak, melyek közti távolság kisebb (55-65 cm), így befolyásolják a sín igénybevételét (hajlítónyomaték, nyíróerő, csavarónyomaték, stb.)

Ennél a módszernél a talpaljakra való felfekvés a blokkok területén egy folyamatos felfekvéssel van helyettesítve, illetve egy b_0 szélességű és keresztalj magasságú fiktív gerendával. A fiktív rendszer a pályára ható erő egy bizonyos értékén ugyanolyan függőleges elmozdulást mutat, mint a valódi rendszer. Ebből a feltételből meghatározzák a fiktív gerenda szélességét. A fiktív gerendát, úgymint a valós vasúti rendszert, egy rugalmas ágy támasztja alá, amely kielégíti a Winkler $p = c \cdot y$ feltételt, vagyis a p reakció arányos az y süllyedéssel, a c arányossági együtthatót ágyazati együtthatónak nevezzük.

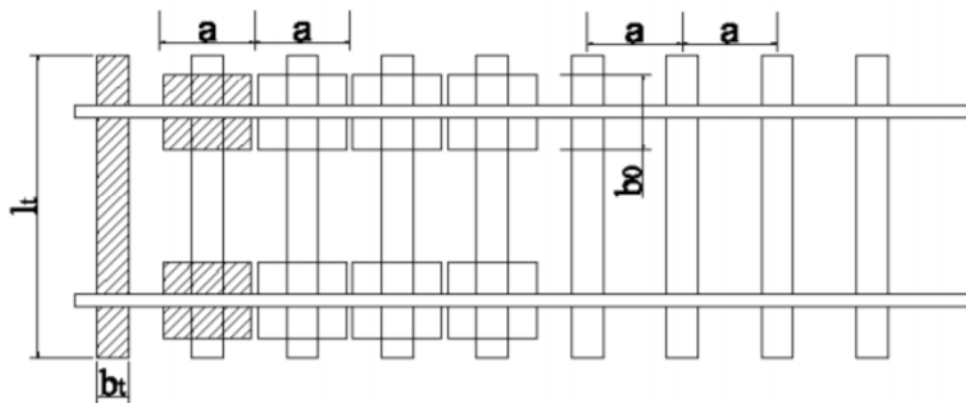
Ebben a számításban az eredmények diszperziója annak a ténynek köszönhető, hogy ez az ágyazati együttható különböző értékeket mutat évszaktól, pálya üzemeltetési időtartamától, a közet jellegétől- illetve granulozitásától, valamint a zúzott kő eltömődésének mértékétől függően.

2. A SÍNBELI HAJLÍTÓNYOMATÉK SZÁMÍTÁSA

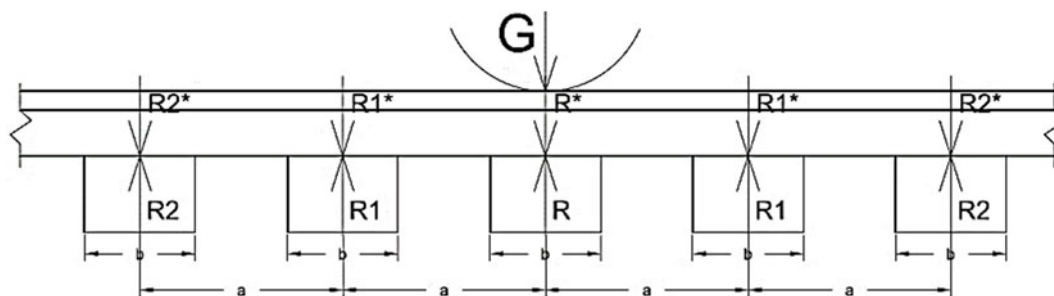
2.1. Számítási feltevések

Mivel a sín egy jelentős szélességű (28-30 cm) támaszra fekszik fel, amelyek kisebb távolságra (55-65 cm) helyezkednek el egymástól, a számítás folyamán a sín alatt egy folyamatos felfekvést veszünk figyelembe, illetve egy b_0 szélességű fiktív hossztartót. A sín a fiktív hossztartóra fekszik fel, míg a hossztartó a Winkler hipotézisét tiszteletben tartó zúzottkő ágyazaton fekszik, a reakció arányos a süllyedéssel, az arányossági együtthatót pedig „c” ágyazati együtthatónak nevezik.

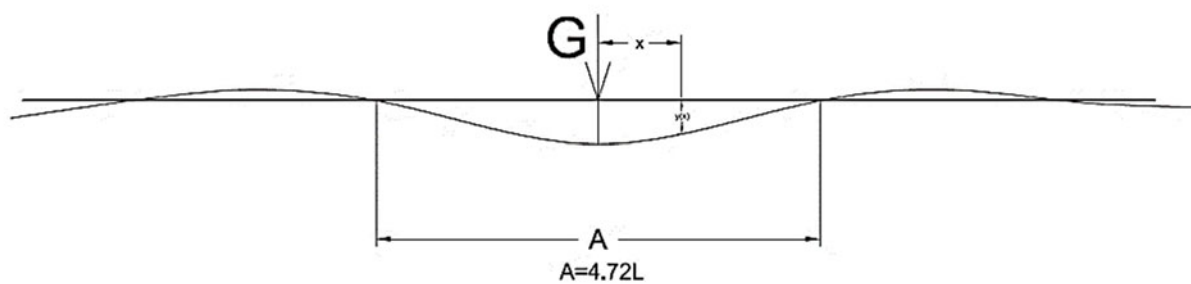
2.2. Számítási modell



1. ábra



2. ábra



3. ábra

2.3. Számítástechnikai kapcsolatok

Az átlagos deformált szál egyenlete, lásd a 3. ábrát.

$$y := \frac{G}{2c \cdot b \cdot L} \cdot e^{\frac{-x}{L}} \cdot \left(\cos\left(\frac{x}{L}\right) + \sin\left(\frac{x}{L}\right) \right) \quad (1)$$

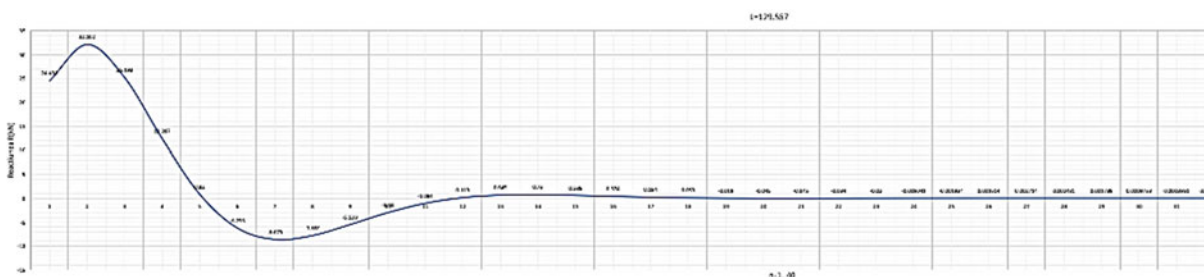
A keresztaljak reakciója a következő képlettel számítható:

$$R := \frac{Ga}{2L} \cdot e^{\frac{-x}{L}} \cdot \left(\cos\left(\frac{x}{L}\right) + \sin\left(\frac{x}{L}\right) \right) \quad (2)$$

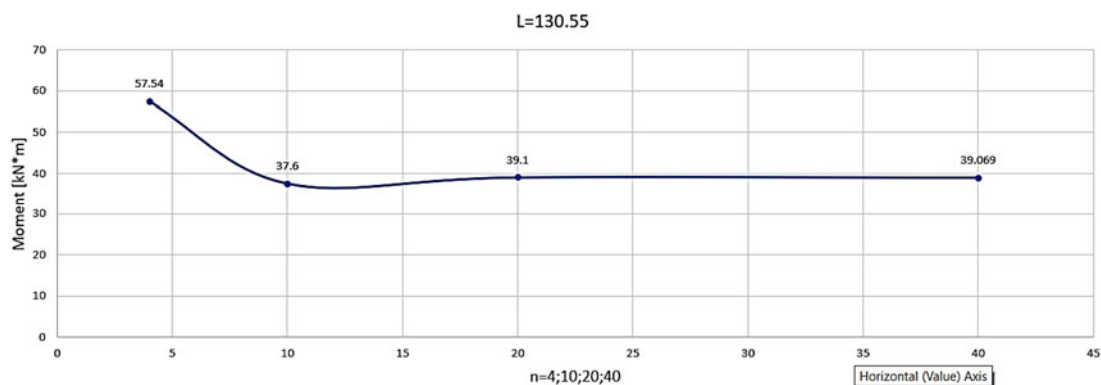
A hajlítónyomaték a G teher szomszédságában levő szakaszban:

$$M_G := \frac{G \cdot a^2}{2 \cdot L} \left[\sum_{n=1}^{\infty} \left[n \cdot e^{\frac{-n \cdot a}{L}} \cdot \left(\cos\left(\frac{n \cdot a}{L}\right) + \sin\left(\frac{n \cdot a}{L}\right) \right) \right] \right] \quad (3)$$

A gyakorlatban véges számú reakció elegendő. Az esettanulmányban 4, 10, 20 vagy 40 keresztaljat számoltunk. Az ábrán láthatjuk a reakciók értékeinek változását, így megfigyelhetjük, hogy amint a reakciók száma növekszik, ezeknek az értéke közeledik a nullához.



5. ábra



6. ábra

Látható, hogy a hajlítónyomaték aszimmetrikusan értékel. (lásd az 5. ábrát)

A számításokat a „c” ágyazati együttható különböző értékeivel és a a = 65 cm aljak közötti távolsággal végeztük.

L a pályafelszerkezet ekvivalens hosszát jelöli.

$$L := \sqrt[4]{\frac{4(E_s \cdot I_s + E_t \cdot I_o)}{b_o \cdot C}} \quad (4)$$

Az eredményeket az 1. táblázatban foglaltuk össze.

1. táblázat:

| Sína | c | a | Traversa | M[kN*m] | | | | L | Nr. Traverse |
|------|----|------|----------|---------|-------|-------|--------|--------|--------------|
| | | | | n=4 | n=10 | n=20 | n=40 | | |
| 60 | 3 | 0.65 | T17 | 63.56 | 44.85 | 44.94 | 44.841 | 148.33 | 11 |
| 60 | 5 | 0.65 | T17 | 57.54 | 37.6 | 39.1 | 39.069 | 130.55 | 9 |
| 60 | 10 | 0.65 | T17 | 46.96 | 31.31 | 32.23 | 32.23 | 109.78 | 8 |

3. KÖVETKEZTETÉSEK

A bemutatott módszer meghatározza a hajlítónyomatékot a sín egy szakaszában, figyelembe véve a keresztaljak reakcióit. A hajlítónyomaték megegyezik a Zimmermann-Eisenmann-módszerrel kiszámított hajlítónyomatékkal, és az értéke közeledik ehhez amint a reakciók száma növekedik.

FELHASZNÁLT IRODALOM:

- [1.] Köllő Szabolcs, Köllő Gábor: *A vasúti betonlajak méretezése*, XX. nemzetközi Építéstudományi Konferencia, ÉPKO, Csíksomlyó, 2016
- [2.] Köllő Szabolcs, Köllő Gábor: *A sín igénybevételének tanulmányozása a kereszt merevségének függvényében*, XIX. Nemzetközi Építéstudományi Konferencia, ÉPKO, Csíksomlyó, 2015
- [3.] Mihai Nechita, Köllő Gábor: *Căi ferate*, Kolozsvár, 1982

Öszvérszerkezetű hidak
Rövid történelmi kronológia – II. rész*

Steel-concrete composite bridges
Short historical chronology – part II.

Poduri cu structură mixtă oțel-beton
Scurta cronologie istorica – partea II.

MOLNÁR Lajos

Kolozsvári Műszaki Egyetem

ABSTRACT

The document presents shortly the evolution of the development of composite structure bridges, chronology of the development of steel-concrete composite structure bridges from 1975 up to nowadays.

Keywords: civil engineering, steel-concrete composite bridges, chronological history

ÖSSZEFOGLALÓ

Az anyag röviden ismerteti az öszvérszerkezetű hidak megjelenésének előzményeit, az acél-beton öszvérszerkezetű hidak megjelenésének kronológiáját és fejlődési fázisait 1975-től napjainkig

Kulcsszavak: közlekedésépítés, öszvérszerkezetű hidak, történelmi kronológia

Az öszvérszerkezetű hidakat a hidépítés több ezer éves történetének utolsó időszakában, mondhatni utolsó 150 évében, kezdték alkalmazni. Rövid áttekintést szeretnék nyújtani ezen időszokról valamint ezen időszak építőmérnöki tervezés és építőanyag minőségi fejlődésének fontos sarokpontjairól, amelyek hozzájárultak az öszvérszerkezetű hidak alkalmazásához és ennek elterjedéséhez azon országokban, amelyekben az ipari fejlődés kényszerhelyzetbe hozta a közlekedésfejlesztéssel foglalkozó szakembereket az alapanyag/áru- és személyforgalom növekvő igényeinek kielégítésére.

A szakirodalom keveset írt eddig az acél-vasbeton merev elemek „összeolvasztásával” készült kompozit szerkezetek történelmi fejlődéséről.

A modernkori öszvérszerkezetű hidak fejlődésével és napjainkban való alkalmazásával folytatjuk a kronológiát.

1.5 Pre-modern korszak (1975-2000)

Ez az az időszak, amelyben az öszvérszerkezetű struktúrák felhasználásának a határait feszegetik.

1.5.1. Alkalmazások Németországban

A „Deutsche Bahn”, a német vasutak használatában levő vasúti hidakat a XX. század elején épült klaszikus, valamint a „Rahmenplanung” keretében kifejlesztett típusú hidak jellemzik. Az utolsó időszakban viszont sok érdekes hídszerkezet fejlesztettek ki és építettek meg, bizonyítva, hogy a német vasúti hídtervezés újra az élvonalba került. A Deutsche Bahn által létrehozott Vasúti Híd Tanács, „Brückenbeirat” és az általa létrehozott „Leitfaden – Gestalten von Eisenbahnbrücken”, vasúti hidak tervezési útmutatója, komoly impulzust és befolyást jelentett ezen időszak németországi vasúti híd fejlődésében.

A nantenbachi vasúti Majna híd (1993) egyik példája a fentieknek – dupla rácsos-tartós, háromnyílású öszvérszerkezetű híd, amely a negatív nyomaték tartományokban duplán-kompozit szerkezetű (a negatív tar-

* A cikk első része megjelent a Műszaki Szemle 70. számában.

tományok is beton övbe foglaltak). A 208 m központi nyílással a Hannover–Stuttgart új építésű vasúti pálya leghosszabb nyílású hídja valamint a német vasúti hálózat leghosszabb nyílású hídja (1. ábra)



1. ábra

Rácsostartós kompozit híd a Majna fölött, Nantenbachnál, 1993 (Foto: tur)

Egy újabb innovatív lépéssel a német vasutak engedélyezték a magasépítésben és a gyalogos felüljárókban már sikeresen alkalmazott, acél öntvény (Cast Steel, Stahlguss) termékek használatát a vasúti hidak építésében. Ezen alapanyag használatával robusztus acél hídszerkezeteket lehet létrehozni alacsonyabb gyártási és karbantartási költségekkel. Ezen anyag felhasználásával forradalmi struktúrák és formák létrehozására kapnak lehetőséget az építészek, a tervezők és a statikusok. Élő példája az előbbieken felsoroltaknak a berlini Humboldt kikötő vasúti hídja (1999), amelyen vékony acél íveket és elosztó csomópontokat alkalmaztak hossz-szasz tesztelési folyamat után (2. ábra). A híd 2008 elnyerte a Német Híd díjat.



2. ábra

A Humboldt kikötői híd, Berlin főpályaudvarnál 1999 (Foto: sbp)

Kisebb nyílások estében nagy sikert könyvelnek el az előregyártott kompozit (öszvérszerkezetű) hidak (VFT-VerbundFertigTeil) építésében. A könnyű kompozit tartók alacsony előállítási költséggel rendelkeznek, valamint gyorsan beépíthetőek a helyszínen. Ezzel a megoldással eddig több mint 600 híd készült el (3. ábra)



3. ábra
VFT típusú híd a Lech folyó fölött Schongaunál, 2001 (Foto: ssf).

1.5.2 Alkalmazások Kínában

Ezen periódus vége felé kezdődik a kínai infrastruktúra fejlesztése. Határozat születik a közúti és vasúti infrastruktúra fejlesztése az országba áramló külföldi beruházások mielőbbi abszorpciója érdekében. Az európai szemmel óriásinak tekinthető projektek közül csak néhányat említünk.

Nanpu híd a Hangpu folyó felett, Shanghai (1991). $L=765$ m, központi nyílás 423 m, pilonmagasság 150 m.



4–5. ábra
Nanpu híd, Hangpu folyó (1991)

Yangpu híd a Nanpu testvérhídja, Shanghai (1993) ($L=8354$ m, központi nyílás 602 m, pilonmagasság 223 m)



6. ábra
Yangpu híd, Hangpu folyó (1993)

Kap Shui Mun híd (1997), Lantau sziget - Hong Kong, $L=820$ m központi nyílás 430 m pilonmagasság 133 m. (7. ábra). Ting Kau híd (1998), Hong Kong, $L=1170$ m, központi nyílás $448/478$ m, pilonmagasság 194 m. (8. ábra)



7. ábra. Kap Shui Mun híd, Hong Kong (1997)



8. ábra. Ting Kau híd, Hong Kong (1998)

1.5.3 Alkalmazások Magyarországon

Az előző részben bemutatott hidak kivitelezési munkái 1975 után befejeződnek.

Megkezdődik az üzemeltetési időszak és az öszvérszerkezetek viselkedésének tanulmányozása, mérések elvégzése, amelyek kielemezése után az alábbi megállapításokra jutottak:

- a maximális lehajlások nem feleltek meg a kiszámított értékeknek,
- az alátámasztásoknál az elhajlás nagyobb volt 5%-al mint a számított érték.

A fenti adatok arra a következtetésre utaltak, hogy az előregyártott pályalemezek használata esetében a híd merevsége kisebb, mint a helyszínen öntött vasbeton pályalemez kivitelezésénél.

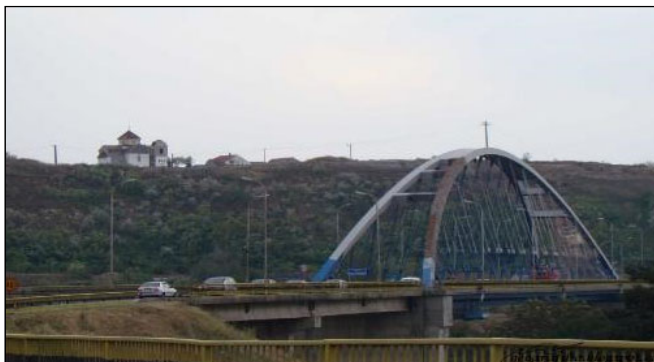
1.5.4 Alkalmazások Romániában

Ebben az időszakban épültek a legfontosabb Duna–Fekete-tenger csatorna hidak a kor legmodernebb követelményei szerint. 1983-ban adják át a medgidiai hidat íves öszvérszerkezetű Langer típusú felfüggesztéssel, $L=131$ m, $B=1,50+14,50+1,50$ m, az acél keresztartók együttműködnek az előfeszített pályalemezzel (9. ábra). 1981-ben adták át a másik, forradalmi, kosárfül tartós öszvérszerkezetű, Nielsen típusú felfüggesztésű közúti hidat, a Basarabi hidat Medgidianál a Duna–Fekete-tenger csatorna fölött, $L=130$ m, $B=1,50+14,50+1,50$ m (10. ábra).



9. ábra

Medgidia, Duna–Fekete-tenger csatorna híd (1983)



10. ábra

Basarabi, Duna–Fekete-tenger csatorna híd (1981)

A Duna–Fekete-tenger északi ágán a Poarta Alba–Midia Navodari ágon 1987-ben két, íves tartós, Langer felfüggesztésű öszvérszerkezetű hidat adtak át Poarta Alba és Ovidiu helységek mellett (11-12. ábra), $L=110$ m, $B=14,50$ m



11–12. ábra. Poarta Alba-Midia-Navodari csatorna, Poarta Alba híd és Ovidu híd (1987)

1983-ben a fő csatorna ág felett átadták az ország első ferdekábeles öszvérszerkezetű hídját, Medgidianál a DN39 Constanta-Mangalia főúton. $L=40,50+162,00+23,00+40,50\text{m}$, aszimmetrikus központi nyílásokkal, két szekrénytartós acél tartóval, acél keresztartókkal és együttműködő vasbeton pályatartóval, $B=1,50+14,80+1,50\text{m}$ (13. ábra)



13. ábra

Duna–Fekete-tenger csatorna, Agigea híd (1983)

1.6 Modern korszak (2000-2025)

Ebben a korszakban teljeseedik ki az öszvérszerkezetű hidak felhasználása, innovatív módon használják fel ezen szerkezet adottságait kihangsúlyozva az esztétikai lehetőségeket, amelyeket ez a megoldás rejteget

1.6.1 Alkalmazások Németországban

Az íves acélhidak alternatívájaként az ezredfordulón kidolgoztak egy, a forgatónyomaték ívet követő tartókkal együttműködő pályalemez öszvérszerkezetet, melyet sikeresen alkalmaztak vasúti hidak kivitelezésénél. Példaként említhetjük az ingolstadti Duna-hídat (2001) (14. ábra) $L=13,42+19,00+22,30+55,15+54,72+19,50\text{ m}$ valamint a brémai Stephanitor felüljárót (2006) (15. ábra). $L=13,00+30,20+13,00\text{ m}$, $M=0,81 - 3,60\text{ m}$



14. ábra

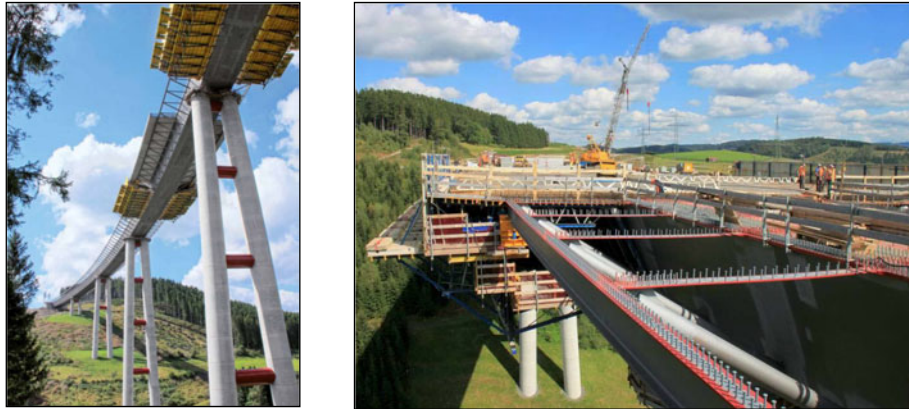
Duna vasúti híd Ingolstadt (2001)
(photo: R Halbe)



15 ábra

Stephanitor vasúti fölüljáró, Bréma (2006)
(photo: M Zimme)

A „Bundesautobahn A46” Nuttlar viaduktot 2015-ben adták át, $L=660$ m ($77,00 + 95,00 + 95,00 + 115,00 + 97,50 + 97,50 + 83,00$), $B=28,6$ m, magassága 115 m (16–17. ábra)



16–17. ábra. Nuttlar viadukt, Nordrhein-Westfalia, A46 Bundesautobahn

2011-ben megszavazták a „Stuttgart 21” fejlesztési programot, amely keretében megépül két új híd a Rosensteinpark és Bad Cannstatt között a Neckar folyó fölött. Az egyik egy új, négy-sávú közúti híd, két, egyenként 75 m központi és három rövidebb nyílással – az öszvérszerkezetű híd a ferdekábeles és az „extradosed” feszített szerkezetek felhasználásának az ötvözetéből alakul ki. A másik pedig egy új öszvérszerkezetű vasúti híd, amely egy vékony acél tartószerkezetre támaszkodik, amely követi a forgató nyomaték diagram alakját, $L=345$ m, $B=25$ m (18.-19. ábra). A munkálatok 2014-ben kezdődtek, és 2021-ig tartanak, szakaszos átadással – 2019-ben már gyalogos és kerékpáros forgalom engedélyezésével.



18–19. ábra. Neckar híd Stuttgart-Bad Cannstatt (2021) (animáció: sbp)

1.6.2, Alkalmazások Spanyolországban

Ebben a korszakban kezdődött el a spanyol gyorsvasút (AVE - Alta Velocidad España) hálózat kiépítése. A tervezett 300 km/h sebesség új tervezési megközelítéshez, a műtárgyak merevségi előírásainak betartásához, és új anyagok felhasználásához vezetett. Két példája a fenti követelmények teljesítésének:

- a Sant Boi de Llobregat (2007) viadukt (20. ábra) $L=870$ m : 340m : 44+63+63+63+63+44 öszvérszerkezet + 530 m feszített betontartós szerkezet, $B=17,0$ m, központi nyílás 63 m,
- az „Arroyo las Piedras” (2005) viadukt a Cordoba–Malaga szakaszon Barcelona mellett (21. ábra), amely az első öszvérszerkezetű vasúti híd a spanyol vasúti hálózatban, $L=1208,9$ m ($50,4 + 17 \times 63,5 + 44 + 35$), $H=93,4$ m, központi nyílás 63,5 m.

Az acél tartókat együttműködő előregyártott betonlemezekkel tették zárt szelvénné, ezáltal jelentősen növelve a felszerkezet merevségét és a torziós ellenállást.



20. ábra
Sant Boi de Llobregat (2007) viadukt
Barcelona mellett



21. ábra
Arroyo las Piedras (2005) viadukt
Cordoba–Malaga

Közúti öszvértartós hidakra az alábbi két példát említhetjük, amelyeknél, a támaszokon dupla-kompozit metszetet létrehozva növelték a dinamikus elválkozás ellenállását mind hajlásra mind torzióra.

Az öszvérszerkezetű, dupla-kompozit hidak fő strukturális előnye a hídnak az utolsó határállapotra adott válaszával függ össze. A híd keresztmetszetek az 1. vagy a 2. osztályba tartoznak, nem csak a nyílásokban, hanem pilléreknél is. Így elkerülhetők a végső határállapotban lévő instabilitási problémák: nem csak a tartók alsó részén a betonnal való együttműködésnél, hanem a felső pályalemezt tartó hálóban is, mivel az alacsony semleges tengely pozíciója előnyére válik egy utolsó határállapotban.

Ennek eredményeképpen biztonságosan és gazdaságosan tervezhető, rugalmas keresztmetszeti elemzésel mind a nyíláson, mind az alátámasztásoknál. Még akkor is elegendő kapacitással rendelkezik, ha globális plaszticitást ér el az utolsó határállapotban az elasztó-plasztikus forgás megfelelő szabályozásával, annak érdekében, hogy elkerülje a törekeny instabilitás kockázatát. Ez a dupla-kompozit keresztmetszet strukturális előnye a klasszikus kettős gerenda alternatívájával szemben.

Mijares folyó feletti közúti híd (2004) $L=48+64+48$ m Betexi-Borriolnál (Castellón) (22. ábra) valamint a Jarama folyó feletti híd (2001) Madrid mellett (23. ábra) központi nyílás 75 m.



22. ábra
Mijares híd, Betexi-Borriol, Castellón (2004)

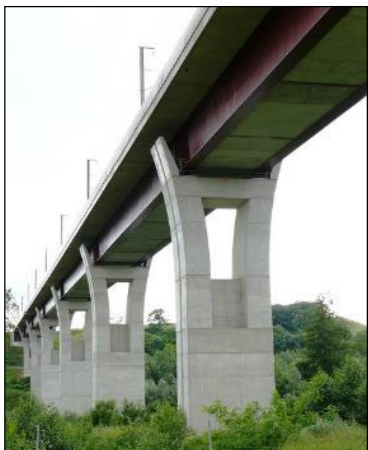


23. ábra
Jarama híd, Madrid (2001)

1.6.3 Alkalmazások Franciaországban

Az öszvérszerkezetű hidak tervezésében és építésében a francia mérnökök kiemelkedőt alkottak ebben a korszakban mind a vasúti mind a közúti szerkezetek esetében. A gyorsforgalmi vasúti hálózat, TGV- Ouest Europa keleti bővítése (1997-2007) során, a Párizs–Strasbourg vonalon, maximálisan igénybe vették a modern, öszvérszerkezetű megoldásokat.

Canal de l'Ourcq (24. ábra) feletti viadukt, $L=452$ m, maximális nyílás 60 m, 8 nyílás valamint a Canal de l'Ouest (25. ábra) feletti viadukt, $L=395$ m, maximális nyílás 41 m, 11 nyílás.



24. ábra
Canal de L'Ourcq viadukt (2004)



25. ábra
Canal de L'Ouest (2005)

A Moselle folyó feletti viadukt (26. ábra) $L= 1510$ m, maximális nyílás 75 m, 27 nyílás valamint a Mosel csatorna feletti viadukt (27. ábra) központi nyílások 54+82+55 öszvérszerkezet a rövid nyílások vasbeton szerkezettel.



26. ábra. Moselle viadukt (2005)



27. ábra. Mosel csatorna viadukt (2005)

1.6.4 Alkalmazások Kínában

Ebben a korszakban is folytatódott a közlekedési hálózat gyors bővítése mind bonyolultabb mérnöki feladatok megoldásával, többek között az együttműködő öszvérszerkezetek előnyös tulajdonságainak a felhasználásával. A Beipanjiang vasúti felsőpályás íves híd (28. ábra) $L=486$ m, nyílása 236 m, $M=275$ m valamint a Wushan, közúti, középpályás íves híd a Yangtze folyó fölött, amely cső elemes tartószerkezete együttműködő acél-beton CFST öszvérszerkezet, $L= 616$ m, nyílás 460 m, $M= 130$ m.



28. ábra. Beipanjiang vasúti híd (2001)



29. ábra. Wushan híd a Yangtze folyó fölött (2005)

1.6.5 Alkalmazások Japánban

Ebben az időszakban kísérleteznek vele, majd széles körben alkalmazzák az öszvérszerkezetek előfeszítését az acél elemekben eredendő feszültségeket hozva létre. Ilyen példa a Himi Yume híd Nagasaki-ban (2004) $L = 365$ m, központi nyílás 180 m (30. ábra). A hidat „extradosed” rendszerben Dywidag technológiával utófeszítették. A Tomoegawa autópálya ikerhidak (2009) Shizuokánál, Kelet: $L = 59,50 + 3 \times 119,00 + 59,50$ m, Nyugat $L = 57,00 + 3 \times 119,00 + 62,00$ m (31. ábra). Ebben a régióban hasonló technológiával készültek a Sarutagawa hidak is.



30. ábra. Himi Yume híd, Nagasaki (2004)



31. ábra. Tomoegawa ikerhidak, Shizuoka (2009)

A Shinkasen gyorsvasúti hálózat kiépítésénél alkalmazott CFST (2000) típusú híd (32. ábra)



32. ábra
CFST típusú híd a Shinkasen gyorsvasút vonalon (2000)

1.6.6 Alkalmazások Magyarországon

Oszlári Tisza-híd (2002) az M3 autópályán (33. ábra), $L=405$ m, a központi (72+112+72 m) a nyílásokat a meder felett öszvérszerkezetű megoldással építették. Budapest nyugati kijáratánál az M1 autópálya felett a Tópark íves felüljáró (2017) $L=50$ m öszvér-szekerénytartós szerkezettel épült meg (34. ábra)



33. ábra. Oszlári Tisza-híd, M3, (2002).



34. ábra. Tópark felüljáró Budapest, M1, (2017)

A Szent István ikerhidakat 2x3 vasúti pálya felett $L=60$ m nyílással építették, helyszínen hegesztett 3 darab I tartóból, monolit a széleken és előre gyártott pályalemezzel a közepén.



35 – 36. ábra

Szent István ikerhidak, Érd (2018)

1.6.7. Alkalmazások Romániában

Pitesti város, A1 autópálya elkerülő szakaszán 12 műtárgy épült (2004-2007), amelyből 3 az Arges folyó (37. ábra) és a Doamnei folyó fölött többtámaszú öszvérszerkezettel készültek el. Az Arges-hidak $L=50+70+50$ m a Doamnei híd pedig 2 külön pályalemezzel 3×60 m, keresztmetszetükben két nyitott szekrénytartóra öntött, együttműködő, vasbeton pályalemezzel rendelkeznek alacsony építési magassággal.



37. ábra
Arges-híd (A1) autópálya (2007)

Az öszvérszerkezetű kerethidakra látványos példa a Campina - DN1, balesetveszélyes útkereszteződés átépítésénél használt megoldás (38 – 39. ábra). A statikai szerkezet 5 darab, egyenként 3x30 m nyílású kerethidat képviselt. A pálya teljes hossza 360 m az 1. valamint 361 m a 2. pályán. A keretek egymásra Gerber típusú alátámasztással fekszenek a pilléreknél. Az acél és a beton közötti együttműködést merev acél csapokkal biztosították. Hosszmetszetben a tartók követték a pálya bonyolult ívét.



38 – 39. ábra
DN1 közúti felüljáró, Campina (2012)

Az együttműködő öszvérszerkezetek további példái a ferdekábeles hidak, amelyekből több is megépült ebben az időszakban.

Az új Agigea híd a Duna–Fekete-tenger csatorna felett (40. ábra), $L=80+200+80$ m központi nyílásokkal, ahol $47+267+46$ m arányban oszlik meg a központi részen együttműködő öszvérszerkezetű – a széleken pedig előfeszített pályalemezzel, melynek keresztmetszete $B=1,00+14,80+1,00$ m. A felszerkezet két zárt acél szekrénytartóból és ezeket összekötő keresztartókból áll, az öszvér részen az acélelemek rugalmas acélcsapokon keresztül kötődnek a beton pályalemezhez. Ezen struktúráknál az öszvérszerkezetű tartók használata lehetőséget ad háromnyílású folytonos tartók szélső nyílásai hosszának a csökkentésére, ezáltal komoly anyagfelhasználás megtakarítást biztosítva.



40. ábra
Új Agigea híd (2016)

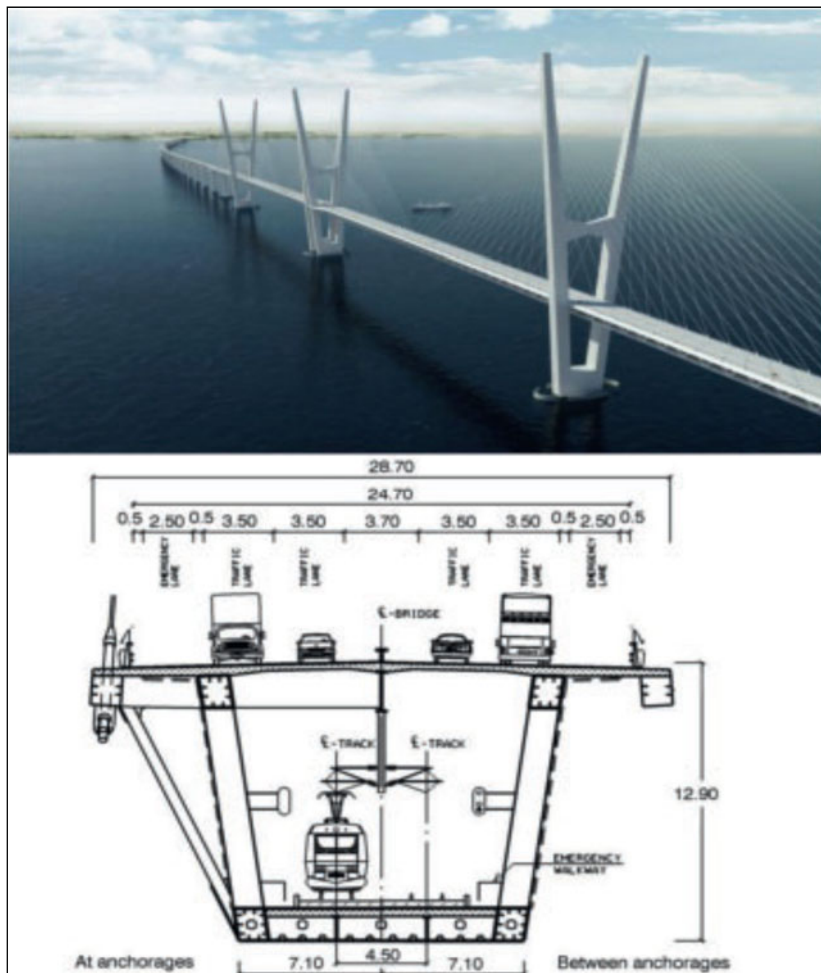
Bukarest, Északi elkerülő, Otopeni felüljáró $L=720$ m, pilonmagasság 47,50 m valamint a Basarabi átjáró Bukarestben a Dambovita folyó és az Északi Vasúti pályaudvar vasút vonalai fölött, $L=1900$ m, pilonmagasság 84 m, pályalemez szélesség 44,50 m



41. ábra. Bukarest Északi elkerülő, Otopeni felüljáró (2011) 42. ábra. Bukaresti, Basarabi átjáró (2011)

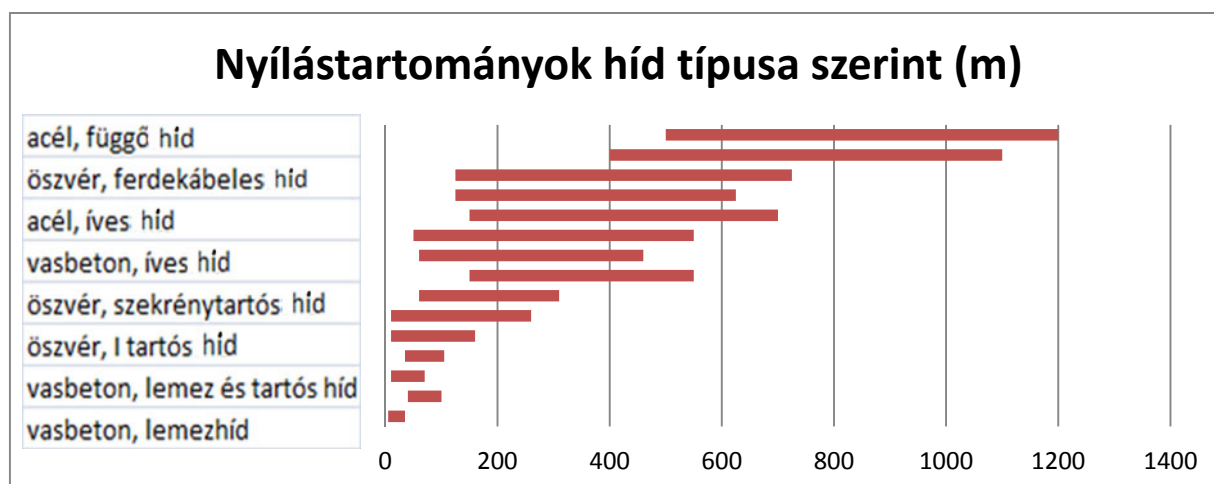
1.6.8. Alkalmazások a jövőben

Fehmarn Belt híd, Németország/Dánia, $L=20$ km, L híd 3 központi nyílás 724 m, $H=280$ m, $B=26,7$ m (43. ábra)



43. ábra
Fehmern Belt híd Németország és Dánia között

2. Optimális, központi nyílás hossz tartományok, hídszerkezetek szerint



3. Következtetések

Az acél-beton kompozit- vagy öszvérszerkezetek a hídepítésben fontos előrelépést jelentenek a fejlődés útján. A két anyag harmonikus együttműködése fontos műszaki-gazdasági előnyökhöz vezet, mint:

- növekszik a szerkezet merevsége a tisztán acél szerkezetekhez képest;
- csökken a szerkezet önsúlya a tisztán vasbeton szerkezetekhez képest;
- lényegesen csökken az állandó és egyben a földrengések által okozott megterhelések mértéke, egyúttal kedvezőbb hatással az alapokra és a felmenőszerkezetre;
- az acélelemek gyárban történő előállításával valamint az egy időben elkezdett infrastruktúra munkálatokkal lényegesen csökken a kivitelezési idő;
- lehetőség közepes és nagy nyílások kivitelezésére komoly akadályok vagy vízfelületek fölött;
- a kivitelezési költségek csökkentése az említett műszaki előnyök figyelembevételével;
- minőségi, esztétikai szempontokat is figyelembe vevő szerkezetek kivitelezése;
- a felhasznált anyagokat a legfontosabb tulajdonságaikat kihasználó helyre lehet helyezni (acélhúzott, beton-nyomott részen);
- eredendő feszültségeket keltve a szerkezetben (feszítettacél-gerenda), csökkenteni lehet a magasságot, és növelni a hasznos terhelést.

Ezen szerkezet negatívumaként az alábbiakat említhetjük:

- magas kezdeti és karbantartási költségek;
- igényes és költséges technológia alkalmazása a kivitelezés során.

FÜGGELÉK

A legfontosabb öszvérszerkezetű hidak (structurae.de)

| Neve | Év | Ország | Nyílás |
|---------------------------|------|--------------------|--------|
| Queensferry Crossing | 2017 | Egyesült Királyság | 650 m |
| Yangpu Bridge | 1993 | Kína | 602 m |
| Xupu Bridge | 1997 | Kína | 590 m |
| Rio-Antirrio Bridge | 2004 | Görögország | 560 m |
| Ting Kau Bridge | 1998 | Kína | 475 m |
| Wushan Bridge | 2005 | Kína | 460 m |
| Queen Elizabeth II Bridge | 1991 | Egyesült Királyság | 450 m |
| Kap Shui Mun Bridge | 1997 | Kína | 430 m |
| Nanpu Bridge | 1991 | Kína | 423 m |
| Fourth Xiangtan Bridge | 2007 | Kína | 400 m |

Szakirodalom

- 1 / Régi – és új típusú öszvérhidak
Rózsás Árpád – Bachelor of Science thesis in Structural Engineering, 2010
- 2 / Poduri cu structure mixte cu conlucrare executate in Romania.
Dr. ing. Victor Popa – Revista constructiilor, ianuarie-februarie 2015
- 3 / Integral Railway Bridges – New Bridges in Germany "Die neuen Brücken der deutschen Bahn"
Mike Schlaich, schlaich bergemann und partner, Germany
"22. Dresdener Brückenbausymposium", 2012, Germany
- 4 / Composite bridge design (EN 1994-2)
Miguel Ortega Cornejo, *IDEAM S.A., University "Europea de Madrid", Spain*
Joel Raoul, Large Bridge Division, Setra/CTOA, Ecole Nationale de Ponts et Chaussées, Paris, France
- 5 / Composite steel-concrete cablestayed bridges: Developments and future trends
Jose J. Oliveira Pedro, Antonio J. Reis – Conference Paper 2013
- 7 / structurae.de – Die größte internationale Datenbank für Bauwerke und Bauingenieure
- 8 / Wikipédia

Alacsony és magas nyomású kipufogógáz visszavezetés hatásvizsgálata haszonjármű dízelmotoron

Combinated Low and High Pressure Exhaust Gas Recirculation Impact Assessment on a Medium Duty Diesel Engine

Cercetări privind efectele recirculării gazelor de evacuare la joasă și la înaltă presiune în cazul unui motor Diesel ce echipază autoutilitare

NYERGES Ádám¹, Dr. ZÖLDY Máté²

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépjárműtechnológia Tanszék
Magyarország, 1111 Budapest, Stoczek utca 6.
www.gjt.bme.hu

¹ +3614632380, adam.nyerges@gjt.bme.hu

² +3614632607, mate.zoldy@gjt.bme.hu

ABSTRACT

In Diesel engines exhaust gas recirculation (EGR) systems are effectively able to reduce the NO_x emissions. In turbocharged internal combustion engines there are two ways to feed back the exhaust gas to the intake side of the engine. These are the low pressure (LP) and the high pressure (HP) loop EGR systems. By intake throttles and exhaust brakes the EGR rate can be influenced. In this article the effect of these systems is analysed and compared on a medium duty commercial vehicle diesel engine. The results are obtained from an engine dyno validated 1D engine simulation model. The aim is to compare the EGR systems and the supporter valves from the NO_x emission and the fuel consumption aspect.

Keywords: diesel engines, low- and high-pressure exhaust gas recirculation, internal combustion engine modelling, exhaust retarder

ÖSSZEFOGLALÁS

A dízelmotorokban a kipufogógáz visszavezető rendszerek (EGR) hatékonyan képesek csökkenteni a NO_x kibocsátást. Egy turbófeltöltésű, belsőégésű motorban kétféle úton lehet a kipufogógázt visszavezetni: a feltöltő alacsony és magas nyomású oldalain (LP és HP EGR). Szívó- és kipufogóoldalon pillangószelepek és kipufogófékek elhelyezésével tovább növelhető a visszavezetett kipufogógáz aránya. Jelen cikk ezeknek a rendszereknek a hatását vizsgálja egy haszongépjármű dízelmotoron. A vizsgálat motorfőpadon validált 1D motorszimulációs modell segítségével történt. A cél a két EGR rendszer és a rásegítőszelepek összehasonlítása az NO_x emisszió és a tüzelőanyag fogyasztás szempontjából.

Kulcsszavak: dízelmotorok, alacsony és magas nyomású kipufogógáz visszavezetés, belső égésű motor modellezés, kipufogófék

1. BEVEZETÉS

A globális felmelegedés miatt a közlekedésben napjaink egyik legnagyobb problémája a belső égésű motorok CO₂ és károsanyag kibocsátása [8]. A közlekedés környezetterhelését rendeletekkel szabályozzák, más területekhez hasonlóan. Az emissziós korlátozások egyre szigorodnak, ezeknek a teljesítése pedig egyre komplexebb felépítésű belső égésű motorok kifejlesztését igényli. Az Euro VI előírás életbe lépése után a tehergépjárműveknél, a jövőbeli előírásoknál pedig további korlátozások várhatók [9]. Korszerű dízelmotorok kipufogógáza elsősorban két lényeges károsanyagot tartalmaz: szilárd részecskéket és NO_x-ot. A két károsanyag együttes csökkentése nehéz feladat, mivel keletkezésük egymással kontraproduktív [6]. A károsanyagok mennyiségét alapvetően kétféleképpen csökkenthetjük. Az első lehetőség a motorikus

károsanyag csökkentés. Ez azt jelenti, hogy az égésfolyamat megváltoztatása révén a hengerből kiáramló kipufogógáz csökkentett károsanyag mennyiséget tartalmaz [1]. A másik lehetőség a kipufogógáz utókezelése, ilyenkor különböző elvű szűrőkkel és katalizátorokkal érjük el a károsanyagok mennyiségének csökkentését [5]. A motorgyártásban manapság a kettős kombinálása jellemző. A jobb égésfolyamathoz a motorkonstrukció megváltoztatása általában nagyobb tudásbázist, több kutatást és tapasztalatot igényel.

A motorikus károsanyagkibocsátás csökkentésének egyik fajtája a kipufogógáz-visszavezetés (EGR). Kipufogógáz-visszavezetéssel nagymértékben csökkenthető a motorikus NO_x emisszió, bizonyos üzemállapotokban pedig a fajlagos fogyasztás, így a CO_2 kibocsátás is. Az égéstérben az inert kipufogógáz megnöveli a töltet hőkapacitását, ezáltal lecsökkenti az égési hőmérsékletet. Ez pedig csökkenti a termikus úton való NO keletkezését.

Alapvetően kétféle módon lehetséges a kipufogógáz visszajuttatása a motorba: belső és külső visszavezetéssel. Belső EGR esetén a szelepezérlés megfelelő hangolásával lehet benntartani, vagy visszaengedni a kipufogógázt a hengerbe. Előnye, hogy gyors, hátránya viszont, hogy a kipufogógáz nem hűthető. Jelen cikk csak a külső EGR rendszerekkel foglalkozik. A külső EGR rendszer a motor kipufogócsatornáiból egy csővel vezeti vissza a kipufogógázt a szívócsatornába. A visszavezetett kipufogógáz mennyisége általában egy fojtószeleppel szabályozható, maximális mennyiségét azonban meghatározza a kipufogó és a szívó oldal közötti nyomáskülönbség. A motor szívó- és/vagy a kipufogó rendszerében további fojtószelepek és kipufogófékek elhelyezésével tovább növelhető a kipufogógáz mennyisége. Egy turbófeltöltésű belső égésű motoron kétféle külső EGR rendszer alkalmazható, ezek az alacsony (LP) és a magas (HP) nyomású kipufogógáz visszavezetések. Az alacsony és magas nyomású EGR rendszerek kombinálásával, valamint a rásegítő fojtószelepek alkalmazásával nagy szabadságfokot lehet elérni a hengerbe jutó közeg összetételének szabályozásában.

Jelen cikk tárgya az említett külső EGR rendszerek és az ezeket támogató fojtószelepek és kipufogófékek hatásvizsgálata. A vizsgálatot és a motorban zajló folyamatok jobb megértését egy 1D motorszimulációs modell segítségével végeztük el [4].

2. ALACSONY ÉS MAGAS NYOMÁSÚ KIPUFOGÓGÁZ VISSZAVEZETÉS

Egy turbófeltöltésű motoron kétféle külső EGR rendszer alkalmazható. A turbófeltöltő magas nyomású oldalán lévő EGR-t magas nyomású kipufogógáz visszavezetésnek (HP EGR), az alacsony nyomású oldalán lévő pedig alacsony nyomású kipufogógáz visszavezetésnek (LP EGR) nevezzük. Természetesen mindkét rendszernek vannak előnyei és hátrányai, ezeket részletesen összefoglalja az 1. táblázat. A HP EGR legfontosabb előnye, hogy kicsi a reakcióideje, mivel sokkal rövidebb utat kell megtennie a visszavezetett kipufogógáznak. Az LP EGR-rel viszont az összes kipufogógáz munkát végez a turbinában, ezért LP EGR-rel a motor effektív hatásfoka általában magasabb.

A HP és LP EGR előnyei és hátrányai

1. táblázat

| HP EGR | LP EGR |
|--|--|
| gyors reakcióidő, tranzienseknél kedvező | stacioner üzemállapotokban kedvezőbb, a turbinában az összes kipufogógáz munkát végezhet, nagyobb feltöltőnyomás |
| rövidebb idő áll rendelkezésre a kipufogógáznak a levegővel történő elkeveredésére | a kondenzvíz kárt tehet a kompresszor lapátoszámban |
| nagy teljesítményigénynél a kompresszor jobb hatásfokú üzemállapotba vihető, azaz csökkenthető a fajlagos fogyasztás | alacsonyabb fajlagos fogyasztás a HP EGR-nél a magasabb feltöltőnyomás miatt |

A két rendszer együttes alkalmazása esetén az rendszerek előnyei kiegészíthetik egymást. Erre jó példa egy tranziens ciklus, ahol hirtelen megnő a motor terhelése. A tranziens kezdetén a HP EGR kis reakcióidőt biztosít a NO_x kibocsátás alacsonyan tartására. Később az LP EGR átveszi a szerepét a magasabb feltöltőnyomás megtartása és a jobb effektív hatásfok elérése érdekében.

A gyártásban lévő korszerű dízelmotoroknál a kettős EGR rendszer alkalmazása még nem jellemző. Előszörban kisebb teljesítményű személygépjármű dízelmotoroknál jelent meg eddig [7, 10]. A kettős EGR

rendszerek hatásvizsgálatáról már található kutatások [2, 3, 11]. A nagyon magas arányú kipufogógáz visszavezetés vizsgálata (40-50%-nál nagyobb arányú) alacsony és magas nyomáson egyaránt eddig még nem képezte kutatások tárgyát.

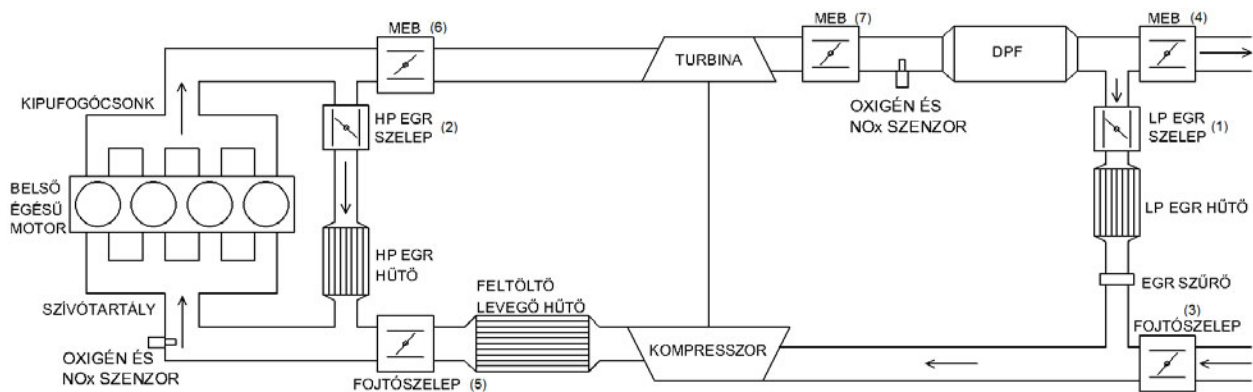
3. MOTORMODELL

A belső égésű motorokban lezajló folyamatok számítását az összetettségük miatt numerikus szimulációkkal célszerű elvégezni. A dízelmotor modellje GT-Suite (Gamma Technologies [4]) környezetben építették fel, mely a [10] cikkben publikált validált motormodellel alapszik.

A motor szívó- és kipufogócsatornáiban hét fojtószelepet lehet elhelyezni, melyek a visszavezetett kipufogógáz mennyiségét szabályozhatják:

- LP EGR szelep (1),
- HP EGR szelep (2),
- alacsony nyomású szívóoldali fojtószelep (3),
- alacsony nyomású kipufogófék (4),
- magas nyomású szívóoldali fojtószelep (5),
- magas nyomású kipufogófék a turbina előtt (6),
- alacsony nyomású kipufogófék a turbina után (a HP EGR-t támogatja) (7).

Ezek elhelyezkedése a töltetcsere rendszerben az 1. ábrán lévő sematikus rajzon látható.



1. ábra

A kutatómotor töltetcsere rendszerének tervezett kialakítása

A HP EGR támogatását végző kipufogófék elhelyezését célszerű megvizsgálni a turbina előtt és után is. A turbina előtti kipufogófék VNT-ként (Variable Nozzle Turbine) is funkcionál. Viszont a turbina után általában könnyebb beépíteni a kipufogóféket, és a turbina hatékonyságának is kedvezhet a rövidebb csatornahossz a kipufogószelepek és a turbina között.

A szimulációs modellben a visszavezetett kipufogógáz tömegaránya a hengertöltetben kétféleképpen számolható:

- a tömegáramokból:

$$x_{EGR_ratio} = \frac{\dot{m}_{EGR}}{\dot{m}_{EGR} + \dot{m}_{air} + \dot{m}_{fuel}} \approx \frac{\dot{m}_{EGR}}{\dot{m}_{EGR} + \dot{m}_{air}} = \frac{\dot{m}_{HPL} + \dot{m}_{LPL}}{\dot{m}_{HPL} + \dot{m}_{LPL} + \dot{m}_{air}}, \quad (1)$$

$$x_{HPL_ratio} = \frac{\dot{m}_{HPL}}{\dot{m}_{HPL} + \dot{m}_{air}}, \quad (2)$$

$$x_{LPL_ratio} = \frac{\dot{m}_{LPL}}{\dot{m}_{LPL} + \dot{m}_{air}}. \quad (3)$$

Az összefüggésekben az x a visszavezetett kipufogógáz tömegaránya, \dot{m} pedig az indexben szereplő keresztmetszeten átáramló tömegáram. Az (1) összefüggésnél a befecskendezett tüzelőanyag tömegárama elhanyagolható, mivel töredéke az átáramló gáz tömegáramának.

- a szívó- és kipufogóoldali O_2 koncentrációkból:

$$x_{EGR_ratio} = \frac{c_{O_2, fresh_air} - c_{O_2, intake}}{c_{O_2, fresh_air} - c_{O_2, exhaust}} \quad (4)$$

ahol c jelöli az indexben lévő gázkomponens koncentrációját.

4. FELHASZNÁLT ESZKÖZÖK

A tesztpadon található dízelmotor főbb paraméterei a 2. táblázatban találhatóak. Tulajdonságai alapján közepes méretű haszonjárművek hajtására célszerű alkalmazni.

A vizsgált motor paraméterei

2. táblázat

| | |
|---------------------------|---------------------------------------|
| Konstrukció: | Soros, 4 hengeres turbódízel |
| Maximális teljesítmény: | 125kW (2500 1/min) |
| Maximális nyomaték: | 600Nm (1200-1600 1/min) |
| Lökettérfogat: | 3,9l |
| Löklet/furat arány: | 1,176 |
| Kompresszióviszony: | 17,3 |
| Befecskendezőrendszer: | Közvetlen befecskendezés, common rail |
| Maximális feltöltőnyomás: | 2,5bar |

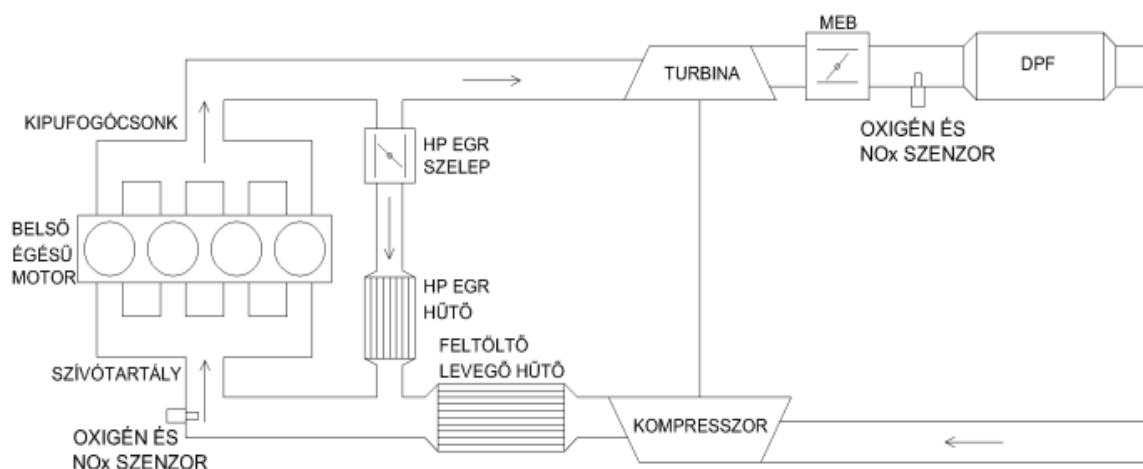
A motor sematikus rajza a kutatási témához kapcsolódó elemekkel a 2. ábrán látható. A motor rendelkezik HP EGR rendszerrel és turbina utáni magas nyomású kipufogófékkel. A szívóoldalon a kompresszor után és a kipufogócsatorna alacsony nyomású szakaszán egy-egy O_2 és NO szenzor található. A visszavezetett kipufogógáz mennyiségének aránya ezeknek a jeleknek a segítségével becsülhető meg:

- az O_2 koncentrációkból:

$$x_{EGR_ratio} = \frac{c_{O_2, fresh_air} - c_{O_2, intake}}{c_{O_2, fresh_air} - c_{O_2, exhaust}} \quad (5)$$

- és a NO_x koncentrációkból:

$$x_{EGR_ratio} = \frac{c_{NO_fresh_air} - c_{NO_intake}}{c_{NO_fresh_air} - c_{NO_exhaust}} \approx \frac{c_{NO_intake}}{c_{NO_exhaust}} \quad (6)$$



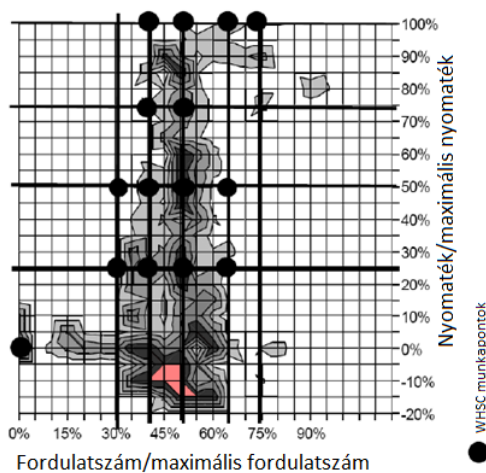
2. ábra

A kutatómotor töltetcsere rendszerének jelenlegi elemei

A szívó- és kipufogócsatornáknban a nyomás és a hőmérséklet a turbófeltöltő előtt és után, valamint a feltöltőlevegő hűtő után is mérhető. Az égésterben a nyomás nagy frekvenciájú mintavételezéssel szintén mérhető, azaz a hengerben végbemenő munkafolyamat indikálható. A hengernyomás alakulásából az égés- és a hőfelszabadulás függvény becsülhető, ez bemenő adat a motorszimulációs validáláshoz. További mérhető jel a motor tüzelőanyag fogyasztása.

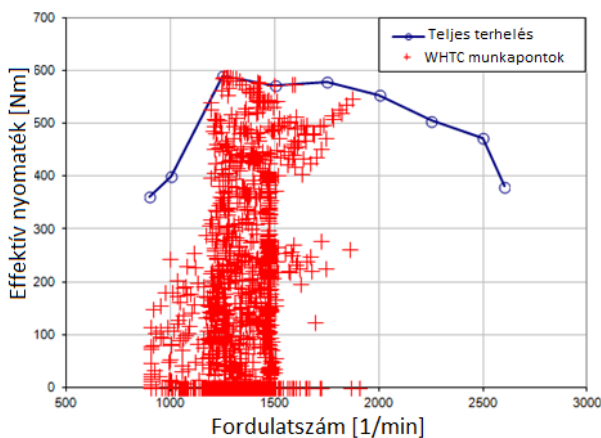
5. MÉRÉSI MEGFONTOLÁSOK

Manapság a belső égésű motorok fejlesztésekor a leghangsúlyosabb követelmények az emissziós előírások. A CO₂ és károsanyag kibocsátást rendeletekben rögzített ciklusokban kell mérni. Jelenleg az EURO VI előírások szerinti haszonjárművekre vonatkozó menetciklusok a WHTC (World Harmonized Transient Cycle) és a WHSC (World Harmonized Stationary Cycle). A WHTC tranziens ciklusokban, a WHSC stacioner munkapontokban méri a károsanyag kibocsátást [9]. A WHSC ciklus munkapontjai a 3. ábrán, a WHTC ciklus munkapontjai pedig a 4. ábrán tekinthetők meg.



3. ábra
A WHSC munkapontok [8]

Ez a cikk csak stacioner munkapontokkal foglalkozik, melyeket a WHSC ciklus figyelembevételével választottuk ki. A vizsgált munkapontok a WHSC munkapontokkal együtt a 3. táblázatban találhatóak. A 4. ábrán látható, hogy a munkapontok túlnyomó többsége 1600 1/min-es fordulatszám alatt van, akárcsak a WHTC ciklus esetében. Ezért a WHSC munkapontok közül 30 és 40%-os fordulatszám (1380 és 1540 1/min) fedi le legjobban a WHTC ciklus üzemtartományát is.



4. ábra
A WHTC munkapontok [3]

A kipufogógáz visszavezetés csökkenti az égésfolyamat légviszonyát (aminek a minimuma a füsttár). Alacsony terhelésű munkapontokban a légviszony magas, ezért elsősorban ebben az üzemtartományban lehet hatásosan nagy mennyiségű kipufogógázt visszavezetni. Jelen cikkben kisebb nyomatékú munkapontok mérési eredményeit értékeltük ki, és éppen ezért kiválasztottuk a 12,5%-os, 75Nm-es terhelést is. Amint a 3. táblázatban is látható, összesen hét munkapontban zajlottak le a mérések, mindegyikben 4-6 különböző visszavezetett kipufogógáz mennyiséggel.

A WHSC munkapontok és a vizsgált munkapontok

3. táblázat

| Terhelés | Nyomaték (Nm) | | | | | | |
|----------------------|---------------|-----|------|------|------|------|------|
| 100% | 600 | | | X | X | X | X |
| 75% | 450 | | X | X | X | | |
| 50% | 300 | | XX | XX | X | X | |
| 25% | 150 | | XX | XX | X | X | |
| 12.5% | 75 | | X | X | | | |
| 0% | 0 | X | | | | | |
| Fordulatszám (1/min) | | 900 | 1380 | 1540 | 1700 | 1940 | 2100 |
| Fordulatszám (%) | | 0% | 30% | 40% | 50% | 65% | 75% |

X WHSC munkapontok
 X Vizsgált munkapontok

A mérés menete a hét munkapontban:

- EGR nélküli munkapont mérése a kipufogófék teljesen nyitott állapotában,
- mérés teljesen nyitott HP EGR szeleppel és teljesen nyitott kipufogófékkal,
- további munkapontok mérése a kipufogófék fokozatos zárásával. Az egyes munkapontokat a szívóoldali O₂ koncentráció egyenletes csökkentésével állítottuk be.

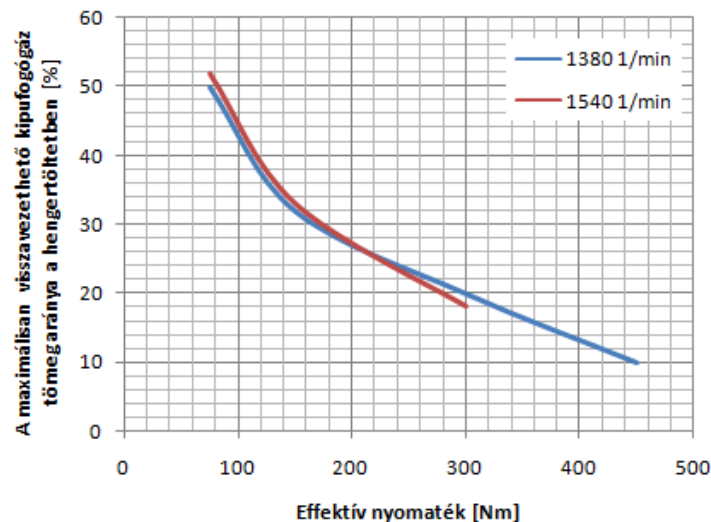
A motormodell validálásához tisztában kell lenni a mérőrendszerben lévő lehetséges pontatlanságokkal. A motormodell validálásánál a pontosabban mérhető mennyiségek kis hibáját szigorúbban kell megkövetelni.

A hengernyomás indikálás, valamint a szívó és kipufogó csatornáknak történő nyomásmérés pontossága elegendőnek bizonyult. Előbbi az égésfolyamat pontos modellezéséhez, utóbbi a turbófeltöltő munkapontjának és a gáztömegáramok becsüléséhez fontos. A tüzelőanyag fogyasztás mérő berendezés pontosságát szintén elfogadtuk.

Az O₂ koncentráció mérés nagy mennyiségű EGR esetén pontosabb, mivel ilyenkor nagyobb az eltérés a levegő O₂ koncentrációjától. A visszavezetett tömegáram arányának a számításakor a különbségüket kell venni, ami ha túl kicsi, akkor pontatlan lehet a végeredmény. A NO_x koncentráció mérés kis mennyiségű EGR esetén pontosabb. Nagy mennyiségű EGR esetén a kipufogógáz NO_x tartalma nagyon lecsökken, ennek mérése természetesen pontatlanabb lehet.

6. MÉRÉSI EREDMÉNYEK

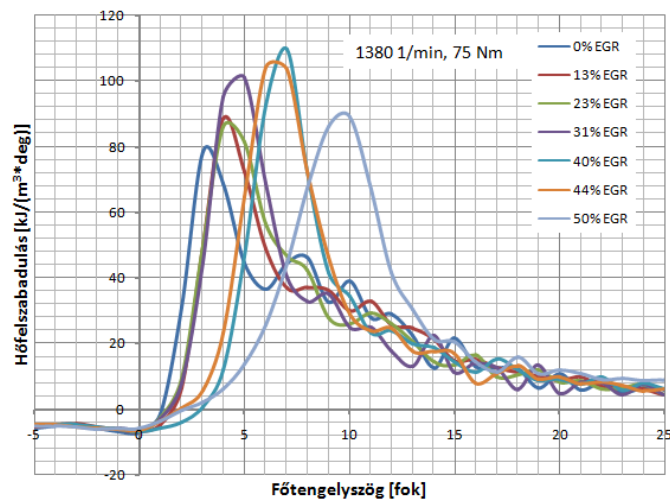
A mérési eredményeken keresztül fontos tapasztalatok is megszerezhetők a nagy nyomású kipufogógáz visszavezetés hatásairól. Az 5. ábrán látható, hogy a terhelés függvényében hogyan változik a hengerbe jutó maximálisan visszavezethető kipufogógáz tömegaránya (kipufogófékes támogatással). Nagy terhelésen a légviszony közelít a füsttárhoz, így ezekben a munkapontokban csak kis mennyiségű kipufogógáz visszavezetés lehetséges (ami még tovább csökkentené a légviszonyt). Alacsony terhelésen a befecskendezett tüzelőanyag dózis kicsi, az égésfolyamat légviszonya magas. Ilyen munkapontokban a visszavezethető kipufogógáz aránya akár 50% fölé is növelhető.



5. ábra

A visszavezethető magas nyomású kipufogógáz tömegarányának maximuma a hengertöltetben kipufogófékes támogatással a terhelés függvényében

A modell validálása szempontjából fontos mérési eredmény volt a hengernyomás indikálása, amiből a hőfelszabadulás, valamint az égésfüggvény is becsülhető. A 6. ábrán egy alacsony terhelésű munkapontban figyelhető meg, hogy hogyan változik a hőfelszabadulás az égésterben megjelenő kipufogógáz hatására. Az égés súlypontja későbbre tolódik akár 7 főtengelyfokkal is, és az égés időtartama is hosszabbá válik. Ez rontja a motor indikált hatásfokát és így a fajlagos fogyasztását is. Emellett a lágyabb égésfolyamat miatt az égés zaj csökken. Az égés súlypontjának későbbre tolódása a befecskendezés időpontjának a módosításával kompenzálható.



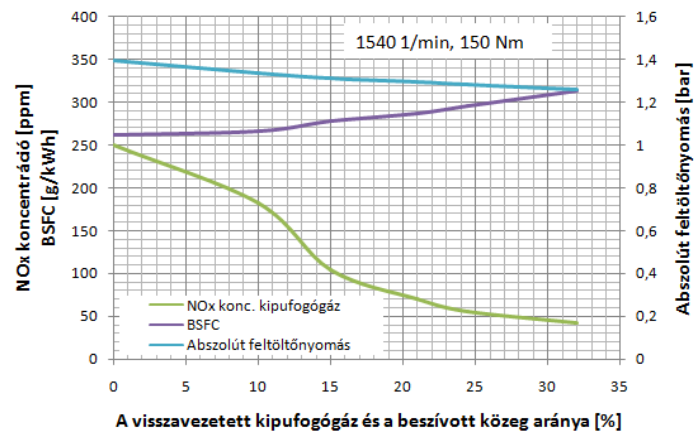
6. ábra

Az égésfüggvény változása a töltet kipufogógáz tartalma függvényében (1380 1/min, 75Nm)

A 7. ábrán az effektív fajlagos fogyasztás (BSFC), a feltöltőnyomás és a kipufogógáz NO_x koncentrációja látható egy kiválasztott munkapontban. Jellemzően a diagram minden munkapontban hasonló. A kipufogógáz arányának a növelésével a feltöltőnyomás csökkenő tendenciát mutat (átlagosan 0,1-0,2 bar csökkenés tapasztalható). Ez annak köszönhető, hogy a HP EGR a turbina tömegáramát csökkenti, azaz a turbófeltöltő kevesebb energiát tud nyerni a kipufogógázból. A megváltozott égésfolyamat és a csökkenő feltöltőnyomás egyaránt oka annak, hogy a fajlagos fogyasztás nő. Nagy arányú HP EGR-nél ez akár a 20%-ot is elérheti.

A NO_x koncentráció csökkenése a leglátványosabb. A 7. ábrán bemutatott munkapontban a kipufogógáz visszavezetés hatására az eredeti koncentráció 16%-ára csökken. Ez szintén az égésfolyamat megváltozásának

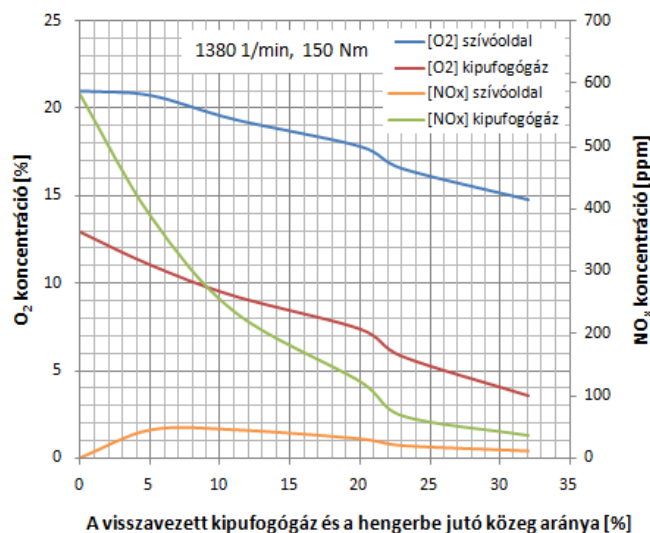
köszönhető. A befecskendezési időpont korrigálása esetén a csökkenés nem lenne ilyen mértékű. Mivel a NO_x és a szilárd részecske képződés egymással kontraproduktív folyamat, a NO_x emisszió csökkenésében elért kedvező eredményt árnyalhatja a részecske emisszió növekedése.



7. ábra

A feltöltőnyomás, a NO_x emisszió és a fajlagos fogyasztás változása a visszavezetett kipufogógáz és a hengertöltet arányának a függvényében (1540 l/min, 150Nm)

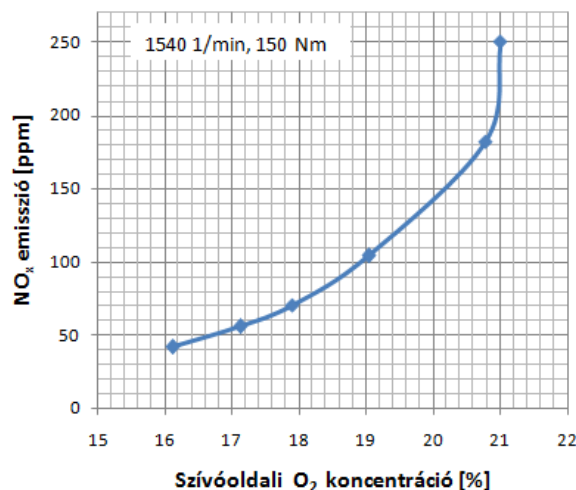
A 8. ábrán az O_2 és NO_x jelek változásai figyelhetők meg. A szívóoldali O_2 koncentráció a visszavezetett kipufogógáz miatt csökken. A kipufogógáz O_2 koncentrációja összefüggésben áll az égés légviszonyával, csökkenő tendenciája azt jelzi, hogy a légviszony a kipufogógáz visszavezetéssel csökken. Egy adott terhelésen a maximális visszavezethető kipufogógáz tömegáramhoz közel 0%-os kipufogógáz O_2 koncentráció tartozik, ilyenkor az égésfolyamat légviszonya sztöchiometrikus. A kipufogógáz NO_x koncentrációja az előbbihez hasonlóan a 8. ábrán is nagymértékű csökkenést mutat. A szívóoldali NO_x koncentráció egy darabig növekszik, majd csökken.



8. ábra

Az O_2 és a NO_x koncentrációk változása a visszavezetett kipufogógáz és a hengertöltet arányának a függvényében (1380 l/min, 150Nm)

Kipufogógáz visszavezetéssel a szívóoldali O_2 koncentráció és a NO_x emisszió is csökken, a két folyamat egymással összefügg. Így a szívóoldali O_2 koncentráció szabályozásával áttételesen kontrollálható a NO_x kibocsátás, ezért célszerű megvizsgálni a köztük lévő kapcsolatot. A 9. ábrán látható munkapont egy jellemző példa erre, látható hogy a szívóoldali O_2 koncentráció függvényében a NO_x koncentráció progresszíven növekedik.



9. ábra

A NO_x emisszió a szívóoldali O₂ koncentráció függvényében (1540 1/min, 150Nm)

7. A MOTORMODELL VALIDÁLÁSA ÉS A SZIMULÁCIÓS BEÁLLÍTÁSOK

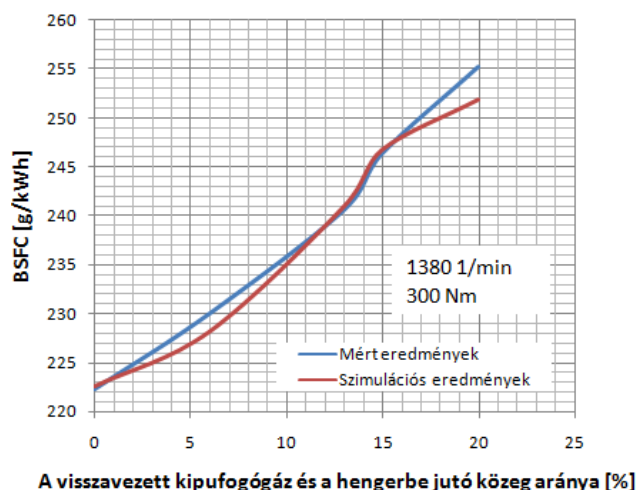
A szimulációs motormodell a [3] forrásban található modellen alapul, felhasználja annak a validált paramétereit. Az itt bemutatott validáció is hasonló lépésekben történt.

A mérések magas nyomású kipufogógáz visszavezetéssel történtek. A szimulációs modellben ugyanezekkel a peremfeltételekkel kell minél pontosabb eredményeket produkálni. A jelentősebb validálójelek, melyek alapvetően meghatározzák a mért jelek és a szimulációs számítások közötti pontosságot, a következők:

- A **hőfelszabadulás- és égésfüggvények** az indikált hengernyomásból számíthatók. A visszavezetett kipufogógáz jelentősen megváltoztatja az égésfolyamatot. Az égésfüggvény elsősorban a hengerben lévő közeg összetételétől és annak a hőmérsékletétől függ, a nyomástól kevésbé. Ezért lehet ugyanazon égésfüggvényeket használni bármely EGR rendszer alkalmazása esetén. A modellben a szívóoldali O₂ koncentráció határozza meg az égésfüggvényt. A munkapontok beállításakor viszont a hengerbe jutó közegben a visszavezetett kipufogógáz aránya azonos volt a méréseknél, valamint a szimulációknál.
- A **kompresszor utáni és a turbina előtti nyomások** pontos beállításával a turbófeltöltő munkapontja becsülhető meg. Ezek nagymértékben meghatározzák a motor indikált hatásfokát, így a fajlagos fogyasztását is. Minél pontosabb ezeknek a nyomásoknak a közelítése, annál pontosabb a tömegáramok becslése is. Ehhez természetesen fontos, hogy a csőszakaszok kontrakciója is pontos legyen ([3] forrásban validált paraméter).
- A **tüzelőanyag fogyasztás** (és így az effektív fajlagos fogyasztás) pontos becslése mellett, hogy egy fontos végeredmény, ellenőrzésként szolgál az előbbi két paraméter beállításának a pontosságáról. Ehhez fontos követelmény, hogy a motor súrlódási veszteségei is megfelelő pontossággal legyenek modellezve ([3] alapján).
- A **kipufogógáz, valamint a beszívott közeg** (levegő és kipufogógáz keveréke) **O₂ és NO_x koncentrációja** elsősorban ellenőrzési célokat szolgál a validációban.

A szimulációs modellben a visszavezetett kipufogógáz mennyiségének szabályozása a tömegáramok meghatározása alapján történt. Ez biztosította a leggyorsabb szabályozási időt és a legjobb pontosságot.

Ezután következett a turbina utáni kipufogófék által támogatott HP EGR szimulációja. A modell finomhangolása után megfelelő pontosságú szimulációs eredményeket adott (a relatív hiba sehol sem nagyobb 5%-nál), így a modell validáltnak tekinthető. A 10. ábrán egy példa látható a számolt és a mért eredmények illeszkedésére, itt a legnagyobb relatív hiba 1,1%-os értékű.



10. ábra

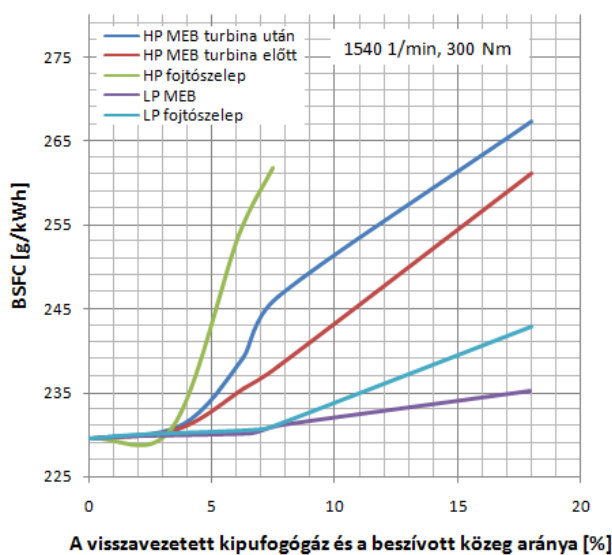
A mért és a számolt fajlagos fogyasztás változása a visszavezetett kipufogógáz és a hengertöltet arányának a függvényében (1380 l/min, 300Nm)

A predikciós szimulációk során a következő kipufogógáz visszavezetési módokat értékeltük ki:

- HP EGR szimulációja:
 - a turbina utáni alacsony nyomású kipufogófékkal támogatva,
 - a turbina előtti magas nyomású kipufogófékkal támogatva,
 - szívóoldali magas nyomású fojtószeleppel támogatva,
- LP EGR szimulációja:
 - alacsony nyomású kipufogófékkal támogatva,
 - alacsony nyomású szívóoldali fojtószeleppel támogatva.

8. HP ÉS LP EGR EGYÜTTES HATÁSVIZSGÁLATA

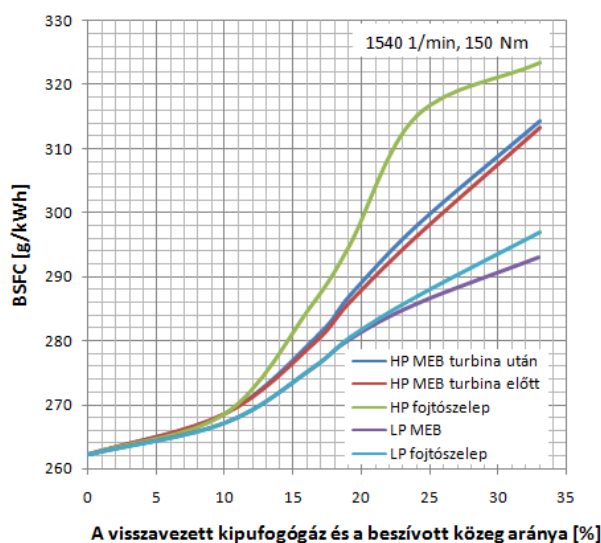
Az eredmények kiértékelésénél a legfontosabb szempont a különböző kipufogógáz visszavezetési módok összehasonlítása volt. A motormodell azonos alapbeállításai miatt a pontosság EGR módok között várhatóan nagyobb az egyes eredmények abszolút pontosságánál.



11. ábra

A fajlagos fogyasztás változása a visszavezetett kipufogógáz és a hengertöltet arányának a függvényében (1540 l/min, 300Nm)

A motor működési jellemzői közül a fajlagos fogyasztás változásának vizsgálata a leginkább reprezentatív. A 11. és a 12. ábrán két különböző munkapontban láthatók az egyes EGR módokhoz tartozó fajlagos fogyasztás görbék. A visszavezetett kipufogógáz tömegáramának a növekedésével a fajlagos fogyasztás minden esetben növekszik, de a növekedések mértéke nagy eltérést mutat. Az alacsony nyomású kipufogógáz visszavezetés az előzetes várakozásnak megfelelően minden esetben alacsonyabb fogyasztást nyújt a magas nyomásúnál. Ez az eltérés a terheléssel arányosan 2-3%-ról 10-14%-ra növekszik.



12. ábra

A fajlagos fogyasztás változása a visszavezetett kipufogógáz és a hengertöltet arányának a függvényében (1540 l/min, 150Nm)

Minden munkapontban megfigyelhető, hogy a szívó- vagy kipufogóoldali ráségítő fojtószelepek közül mindig a kipufogófékekkel lehet alacsonyabb fajlagos fogyasztást elérni. Kipufogófékek alkalmazásával a turbina nyomásviszonya csökken, a kipufogógáz kisebb munkát végez a járókeréken, a kompresszornak pedig nem kell fölösleges munkát végeznie. Az eltérés LP EGR esetén maximum 2-4% (ennyivel alacsonyabb a fajlagos fogyasztás kipufogófékekkel a szívóoldali fojtáshoz képest). HP EGR alkalmazása esetén ugyanezen eltérés nagyobb, 4-6% is lehetséges. A terhelés növekedésével a különbség növekszik. Alacsony terhelésen a különbségek elhanyagolhatóan kicsik.

A HP EGR rendszerrel érdemes megvizsgálni, hogy a turbina előtt vagy után célszerűbb-e elhelyezni a kipufogóféket. Az eredmények alapján a turbina előtti elhelyezés kedvezőbb, 2-3% fogyasztáscsökkenés érhető el vele. A turbina előtti kipufogófék egyébként VNT-ként működik, azaz javítja a turbina nyomásviszonyát.

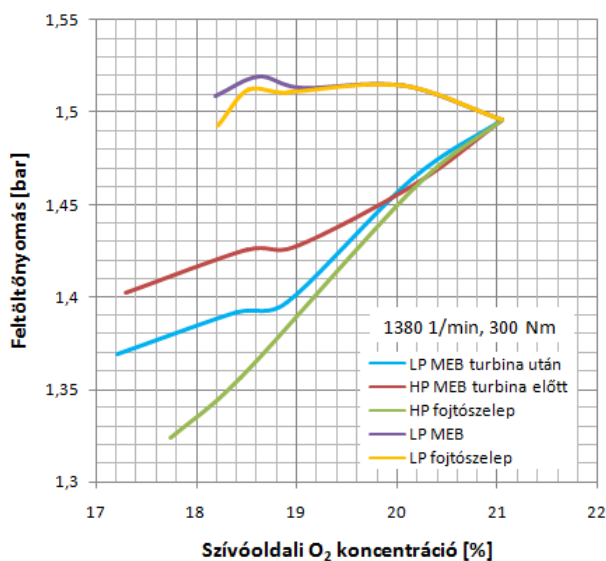
A 11. ábrán a szívóoldali fojtószelep támogatású HP EGR-sel nem lehetett tovább növelni a visszavezetett kipufogógáz tömegáramát. A turbófeltöltő munkapontjának eltolódása oly mértékben rontotta a motor indikált hatásfokát, hogy a kipufogógáz O_2 tartalma már 7,5%-os visszavezetett kipufogógáz tömegarányánál is lényegében nullára csökkent.

Az eltéréseket vizsgálva kijelenthető, hogy a fajlagos fogyasztás szempontjából az LP és a HP EGR között mindig nagyobb a differencia, mint a különböző ráségítőszelepek alkalmazása között. Ez látható a 12. ábrán is.

A fajlagos fogyasztást ábrázoló diagramokon megfigyelhető még, hogy a hengerbe jutó töltetben milyen arányú kipufogógáz mennyiség volt elérhető csak az EGR szelepek alkalmazásával. A kipufogófékes és a fojtószelepes görbék ott kezdenek el egymástól eltérni, ahol már csupán az EGR szeleppel nem lehetett tovább növelni a visszavezetett kipufogógáz tömegáramát.

Az eredményeket eddig a visszavezetett kipufogógáz és hengerbe jutó töltet arányának a függvényében vizsgáltuk. A tömegáramok aránya jól szemlélteti a hatásokat, azonban célszerű megvizsgálni egy másik szempontból is az eredményeket. A hőfelszabadulás és a károsanyag kibocsátás elsősorban a hengerben lévő közeg összetételétől és hőmérsékletétől függ. Az EGR és a ráségítőszelepek nemcsak a tömegáramokat szabályozzák, hanem a gázösszetételeket is. A gyakorlatban ráadásul a gázösszetétel mérése általában könnyebb a tömegáram mérésénél. Mindezek miatt célszerű a korábbi eredményeket a szívóoldali O_2 koncentráció függvényében is megvizsgálni.

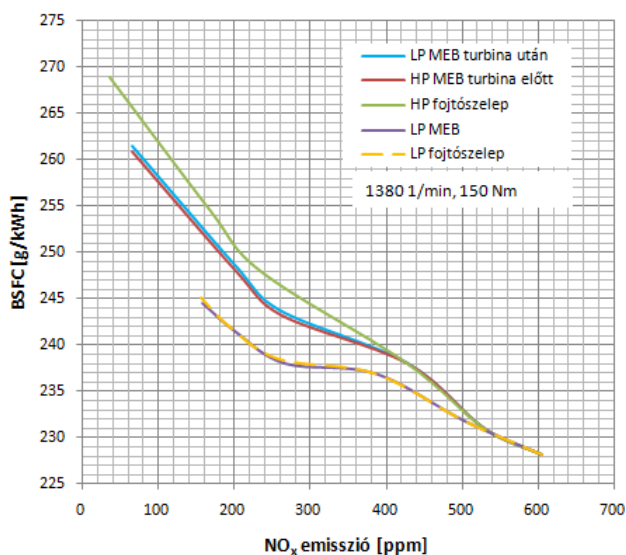
Ez látható a 13. ábrán. Fajlagos fogyasztás szempontjából természetesen ugyanaz a sorrend kapható a különböző EGR módokra.



13. ábra

A feltöltőnyomás változása a szívóoldali O₂ koncentráció függvényében (1380 l/min, 300Nm)

Azonos szívóoldali O₂ koncentráció eléréséhez az alacsonyabb fajlagos fogyasztású EGR módok esetén nagyobb visszavezetett kipufogógáz tömegáramot kell biztosítani. Az alacsonyabb fajlagos fogyasztás a jobb égésfolyamatnak és a turbófeltöltővel való jobb együttműködésnek köszönhető. Nagyobb feltöltőnyomás esetén a fajlagos fogyasztás alacsonyabb, emiatt pedig a kipufogógáz O₂ koncentrációja nagyobb. Nagyobb O₂ tartalmú kipufogógáz visszavezetésével pedig nehezebb csökkenteni a szívóoldali O₂ koncentrációt, ami egyébként a fő cél.



14. ábra

Az effektív fajlagos fogyasztás változása különböző EGR módokkal a NO_x koncentráció függvényében (1380 l/min, 150Nm)

A fogyasztásnövekedésnek az égésfolyamat megváltozása mellett a legfőbb oka a feltöltőnyomás csökkenése. Ez elsősorban a magas nyomású kipufogógáz visszavezetésre jellemző, mint ahogyan a 13. ábrán is látható. Ez a legfőbb oka a LP EGR előnyének stacioner munkapontokban a HP EGR-rel szemben. Az alacsony nyomású kipufogógáz visszavezetésénél kis mértékben még növekedhet is a feltöltőnyomás. A későbbre

tolódó és elhúzódo égésfolyamat növeli a kipufogógázok hőmérsékletét, ami nagyobb turbina nyomásviszonyt eredményezhet. A feltöltőnyomás megváltozása szempontjából is ugyanaz a sorrend állítható fel a különböző EGR módokra, mint a korábbiakban.

Alacsony terhelésen a feltöltőnyomás nem jelentős. A terhelés csökkenésével a különbség a HP és LP EGR rendszer között szintén csökken, nagyon alacsony terhelésen lényegében el is tűnik.

Az emissziós előírások többek között a NO_x emissziót is limitálják. A különböző NO_x csökkentő eljárások között a fogyasztás növelő hatásuk tesz különbséget. A 14. ábrán látható az egyik jellemző munkapontban (1380 1/min, 150Nm), hogy a kipufogógáz NO_x koncentrációja mekkora mértékű fajlagos fogyasztás növekedés árán csökkenthető. A LP EGR és a HP EGR között itt is jelentős eltérés tapasztalható.

9. KÖVETKEZTETÉSEK

A kutatás célja az alacsony és magas nyomású kipufogógáz visszavezetés összehasonlítása volt stacioner munkapontokban egy 4 literes turbótöltésű dízelmotoron. A két visszavezetési mód tömegáramát szívóoldali fojtószelepekkel és kipufogófékekkel lehetett fokozni. Így összesen 5 féle EGR mód vizsgálható meg, illetve hasonlítható össze. Az eredményeket egy szimulációs motormodell adta. A motormodell validálása mérési eredmények alapján történt. Az eredmények célja, hogy képet adjon a különböző EGR módok hatásáról a motor munkafolyamatában, valamint hogy bemutassa, hogy a motor üzemi jellemzői szempontjából mely fojtószelep vagy kipufogófék a kedvezőbb választás.

Kipufogógáz visszavezetéssel a belső égésű motor égésfolyamata és töltetcsereje is megváltozik (utóbbi esetben a turbófeltöltő és a belső égésű motor együttműködése változik meg). A szimulációs modellben az égésfolyamat definiálása mért adatok alapján történt.

Stacioner munkapontokban a különböző EGR módok között fajlagos fogyasztás szempontjából az alábbi sorrend állítható fel:

- LP MEB (a LP EGR-t támogatja) – legalacsonyabb fajlagos fogyasztás,
- LP fojtószelep,
- HP MEB a turbina előtt,
- LP MEB a turbina után,
- HP fojtószelep – legmagasabb fajlagos fogyasztás.

Az alacsony nyomású EGR stacioner munkapontokban a vártan megfelelően mindig alacsonyabb fajlagos fogyasztást nyújtott. A kipufogófék minden esetben jobb választásnak bizonyult a szívóoldal fojtásánál.

A változások okai a megváltozott égésfolyamatban és töltetcsereben keresendők. Fontos megállapítani, hogy az égésfolyamat megváltozása már önmagában is a töltetcsere megváltozását idézi elő. Az égésfolyamat főként a hengerbe jutó közeg összetételétől és hőmérsékletétől függ, ezek viszont függetlenek a kipufogógáz visszavezetés módjától. Az eltérések oka így főként a töltetcsere megváltozásában keresendő: a különböző EGR módoknak a feltöltőnyomásra gyakorolt hatása jelentősen eltér egymástól.

A különböző EGR rendszerekkel elért fajlagos fogyasztás-eredmények csökkenthetők még a befecskendezési időpont megváltoztatásával. Korábbi befecskendezéssel az EGR-es égés késedelme korrigálható, így tovább csökkenthető a fogyasztás. A jövőben célszerű lesz még a megváltozott égésfolyamatnak a szilárd részecske emissziójára gyakorolt hatását is megvizsgálni.

A gyors reakcióideje miatt a dízelmotorokon szükség van HP EGR rendszerre. Tranziens ciklusoknál a LP EGR rendszer lassú reakcióideje nem tudja kellően alacsonyan tartani a NO_x emissziót. Kettős EGR rendszer alkalmazása esetén az előnyök így éppen kiegészítik egymást. Ilyen komplex rendszernek a szabályozása további kutatási lehetőségeket rejt.

6. IRODALMI JEGYZÉK

- [1] Bárdos, Á., Vass, S., Németh, H.: Validation of a detailed commercial vehicle turbocharged diesel engine model, A Jövő Járműve, 2014, 1-2.
- [2] Banks, A., Niven, M., Andersson, P.: Boosting technology for Euro VI and Tier 4 final heavy duty diesel engines without NO_x aftertreatment, Ricardo Consulting Engineers Ltd, Shoreham-by-Sea, UK 2010.
- [3] Balakrishnan, S., Sivanandan, R.: Developing free-flow speed models for urban roads under heterogeneous traffic conditions. International Journal for Traffic & Transport Engineering, 7(4). 2017.
- [4] Zamboni, G., Capobianco, M.: Experimental study on the effects of HP and LP EGR in an automotive turbocharged diesel engine, Applied Energy, 94, 2012, 117-128.
- [5] GT-Suite 7.3 User's manual, Gamma Technologies Inc. 2012.

- [6] Ildarkhanov, R.: The Calculation of the Fuel Cost for a Car, Periodica Polytechnica Transportation Engineering. doi: <https://pp.bme.hu/tr/article/view/10553>.
- [7] Jamrozik, A., Tutak, W., Pyrc, M., Gruca, M., Kočiško, M.: Study on co-combustion of diesel fuel with oxygenated alcohols in a compression ignition dual-fuel engine. Fuel, 221, 2017, 329-345.
- [8] The New “Earth Dreams Technology i-DTEC” 1.6 L Diesel Engine from Honda, 34. Internationales Wiener Motorensymposium, 2013.
- [9] Tutak, W., Lukács, K., Szwaja, S., Bereczky, Á.: Alcohol–diesel fuel combustion in the compression ignition engine. Fuel, 154, 2015,196-206.
- [10] United Nations Global technical regulation No. 4; 25 January 2007
- [11] Volkswagen’s new modular TDI® generation, 33. Internationales Wiener Motorensymposium 2012.