

ÜLŐSZÉKES LIBEGŐ LEGNAGYOBB IGÉNYBEVÉTELŰ OSZLOPÁNAK STATIKAI- ÉS DINAMIKAI VIZSGÁLATA

Dr. habil. Illés Béla*, Dr. Németh János**

Egy hazánkban üzemelő, ülőszékes libegő legnagyobb igénybevételű oszlopának statikai- és dinamikai vizsgálatát végeztük el, mert a berendezés üzemeltetése során a tervezésből, a kivitelezésből és a karbantartásból eredeztethető hiányosságok miatt nem várt mértékű lengések léptek fel és az utazók biztonságérzetét ezek a jelenségek hátrányosan érintették.

A berendezés statikai vizsgálata egyrészt a vonóelemben ébredő húzóerő-diagram meghatározásából, a kritikusnak ítélt oszlopra ható, tengelyére merőleges és párhuzamos erők (a vonóelem támaszra fel- és lefutó ágaiban ébredő húzóerővel, a súlyerőkkel és a szélterhelésekkel arányos) és nyomatékok meghatározásából különféle determinisztikus jellegű terhelési programok esetén (felfele terhelt – lefele üres, felfele üres – lefele terhelt, mindkét irányban üres, 40%-kal megnövelt feszítősúly névleges terhelésnél, 40%-kal megnövelt névleges terhelés esetén), másrészt a dinamikai jellemzők meghatározásából állt. A vizsgálatokat alapján megállapítottuk, hogy a 6 mm falvastagságú, változó keresztmetszetű, zárt szelvény összetett igénybevétele a 40%-kal megnövelt feszítősúly és üres terhelésű, program esetén adódott a legnagyobbra. A méréseket és a számításokat az oszlopszerkezet 4 legnagyobb terhelésű keresztmetszeténél végeztük el a kritikus irányú, kötelekre és oszlopra ható szélterhelést is figyelembe véve. Megállapítottuk, hogy vizsgált kritikus keresztmetszetek (A-kereszttartó, B-oszlopnyak, C-a középső oszloptoldás, D-talpazathoz rögzítés) összetett igénybevétele a legnagyobb terhelést biztosító terhelési program (felfutó ág terhelt, lefutó ág üres) esetén nem haladta meg a 160 MPa értéket (a megengedett feszültség: 180 MPa), tehát az oszlopszerkezet a statikus igénybevételre megfelel.

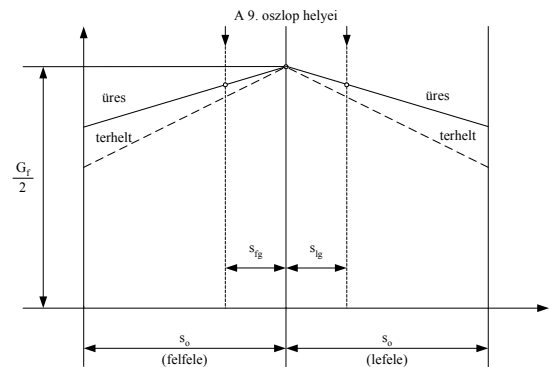
A legnagyobb igénybevételű keresztmetszet az A jelű, mert a konzolhatás miatt ez a keresztmetszet jelentős hajlításnak és nyírásnak van alávetve, a csavarása elhanyagolható. Ebben a keresztmetszetben a bélyegek tengelyét a konzol tengelyével párhuzamosan vettük, mert a nyomásból és a hajlításból származó igénybevétel így érzékelhető.

A C és D keresztmetszeteken 8-8 db mérőbélyeget helyeztünk el az összetett igénybevétel meghatározására. A mérésnél $v=1,5$ m/s haladási sebességet állítottunk be.

* Ph.D., egyetemi tanár, tanszékvezető, dékán, e-mail: atilles@uni-miskolc.hu, Miskolci Egyetem, Anyagmozgatási és Logisztikai Tanszék

** Ph.D. egyetemi docens, e-mail: altnemet@uni-miskolc.hu, Miskolci Egyetem, Anyagmozgatási és Logisztikai Tanszék

Az ülőszékekbe 2 fő ült (kb. 180 kg tömeg) és váltakozva le-fel illetve a másik oldalra áttérve szintén le-fel mozgattuk az oszlophoz viszonyítva ± 30 m távolságra. Ha a húzóerő diagramot vizsgáljuk (1. ábra) a 9. oszlopra vonatkozóan, akkor megállapítható, hogy a húzóerő üres ülőszékeknel a legnagyobb, a konzolhatás pedig akkor érezhető jól, amikor egy-egy terhelt függeszték a görgősoron áthalad.



1. ábra A kötélben ébredő húzóerő alakulása a pálya mentén önsúly- és névleges terhelés esetén

Az 1. ábra jelölései:

- S – a húzóerő változása a vonóelem hossza mentén,
- G_f – a feszítősúly,
- s_0 – felfele szállító ág vonóelemének kiterített hossza, amely egyezik a lefele szállító ág hosszával,
- $s_{ig} = s_{ig}$ – a 9. oszlop távolsága (a vonóelem kiterített hossza alapján) a felső fordítótárcsa tengelyétől.

A mérési eredmények azt igazolták, hogy a statikus terhelés által meghatározott legnagyobb feszültségnek a 10%-át nem haladta meg a mért dinamikus feszültség.

Az oszloptoldás és az oszlop alaphoz rögzítése között a haladási irányra merőleges lapokon a lemez kidomborodását tapasztaltuk. Lélegzésszerű mozgást végzett a terhelt függeszték áthaladása során. Itt két bélyeget helyeztünk el egymásra merőlegesen, hogy ezen a helyen meghatározzuk a horpadó lemez feszültségállapotát. A horpadás a nyomó- és a hajlító igénybevétel együttes hatására következhet be. A vizsgálat során nem mértünk akkora dinamikus feszültségingadozást (45-70 MPa), ami a számított statikus érték figyelembe vételével maradót horpadást okozott volna.

Összességében megállapítható, hogy az oszlop a kritikus igénybevételek figyelembe-vétele esetén sem rendelkezik olyan szűk keresztmetszettel, amelynek igénybevétele, illetve feszültségállapota a megengedett értéket meghaladta, tehát az oszlop szilárdságilag megfelelőnek minősíthető.

A feszültségmérések is igazolták, de a piezoelektromos mozgásérzékelőkkel felvett és Fourier-analízissel vizsgált amplitúdó-frekvencia függvénymenetek is igazolják azt, hogy az oszlop rezgéstaniilag nem felel meg, mert rezonancia lehetséges.

A mérések során 2 fő a kezelőrámpán kikötve az oszlop-szerkezetet a pálya irányában szinkron-mozgással lengésbe hozta. Ilyen esetben a „horpadó keresztmetszet” igénybevétele már jelentősen ingadozott (-80+150 MPa).

Az a megállapításunk, hogy az oszlop lengéstaniilag rosszul méretezett azzal a megfigyelésünkkel is összhangban van, hogy az alkalmazott 8-8 db görgőből 1-1 db jelentős radiális ütessel rendelkezik. Amikor a függeszték (terhelt vagy terheletlen) a görgőszéken végighalad, lengést gerjeszt, amely az oszlopot bólogató mozgásba hozza. A bólogatás hajlító-lengés jellegű akkor, amikor a két görgő közel szinkronban gerjeszt. Ha az excentricitások ellenfázisba kerülnek, akkor a bólogatást felváltja a váltakozó irányú csavarás. A görgők súrlódó hajtása miatt az említett bólogatás és csavargatás többnyire együtt jelentkezik és egyfajta kóválygó mozgást eredményez. Ezt a jelenséget fokozza még a húzóerő változással arányos helyi veszteség és az oszlop hajlítását eredményező különböző irányú szélterhelések is.

A kóválygó mozgás kiküszöbölése csak úgy lehetséges, ha a helyszíni szemle során megjelölt görgők „betétezését” kicserélik, illetve megfelelően beszabályozzák.

Az oszlopot a tervezett magassághoz képest meghosszabbították, de az alap tömegét nem változtatták meg. A kóválygó lengés egyik komponense a hajlító lengés, aminek elemzésére részletesebb vizsgálatot mutatunk be. A korszerű személyszállító kötélpályáknál a vonóelem-ill. a szállítóelem megtámasztására előszeretettel alkalmaznak vékonyfalú szekrényszerkezetű oszlopokat, mert ezek a viszonylag kis tömegük ellenére a fellépő statikus és dinamikus terheléseket kedvezően viselik. A vizsgálattal az ilyen szerkezetek dinamikus viselkedésének meghatározására alkalmas módszert mutatjuk be, amikor a gerjesztő hatások közül a hajlító lengések a meghatározóak. Ezen oszlopszerkezetekre a kötélzetről átadódó igénybevételek mellett – a zárt szelvényből adódó nagy felületek miatt – jelentős szélterhelés is hat, mint az oszlopot hajlító gerjesztő hatás. A szélterhelést az EUROCODE 3 szerint vettük figyelembe a vizsgálatoknál. Az oszlop dinamikai viselkedésének elemzése az utasok biztonságérzete szempontjából is fontos, különösen az alacsony frekvencia tartományba eső rezgések frekvenciáinak meghatározása.

A 2. ábra a vizsgált oszlopszerkezet jellemző méreteit mutatja. A pálya nyomvonalvezetésének módosítása miatt szükségessé vált a tartóoszlop hosszának növelése, ami annak hajlító rugalmasságát és ezzel dinamikai

viselkedését jelentősen módosította. A fellépő gerjesztések hatására az oszlop jelentős mértékben kileng, amely veszélyezteti a kötél megvezetését és az ülőszéken utazók biztonságát. Az oszlopalapozást is a régi kisebb terhelésű és hosszúságú oszlophoz tervezték meg, ami a támasztórendszer stabilitását tovább rontja. A dinamikai modellnél az oszlopot olyan ideális befogású rúdnak fogjuk fel, amelynek keresztmetszeti jellemzői és a rugalmas semleges szál elmozdulási függvénye a 2. ábra szerint alakul, amelynél A_i a keresztmetszetet, az I_{xi} az x tengelyre, I_{yi} számított másodrendű keresztmetszeti nyomatékot, $q(z,t)$ az elhajlási függvény a hely- és idő függvényében. A keresztmetszeti jellemzőket a 2. ábrával együtt közölt táblázat foglalja össze. A hajlító lengések sajátfrekvenciáját a rúd végén elhelyezett redukált m_r tömeg (amely az oszlop tetején elhelyezett tömegek; görgősorok, a görgőtartók, a keresztgerendák és a kötélzet redukált tömege mellett tartalmazza az oszlop redukált tömegét is). A redukált tömeg meghatározásával nem kívánunk foglalkozni, de ennek meghatározása az alábbi összefüggéssel történt:

$$m_r = m_t + \eta_o \cdot m_o + \eta_k \cdot m_k \quad (1)$$

Ahol; m_t – az oszlop tetején elhelyezett koncentrálnak tekinthető tömegek összege,
 m_o – az oszlop tömege,
 m_k – a kötél, a hasznos terhelés és az ülőszékek együttes tömege,
 η_k, η_o – redukációs tényezők

A hajlító rezgéseket leíró mozgástörvényt egy az alakváltozási függvénynek $q(z,t)$ az idő (t) szerint vett második deriváltját, valamint a helynek (z) vett negyedik deriváltját tartalmazó nemlineáris differenciál-egyenlettel lehet megfogalmazni, mint kontinuum lengést:

$$\rho_a \cdot A(z) \cdot \left(\frac{d^2}{dt^2} q(z,t) \right) + I_v(z) \cdot E \cdot \left(\frac{d^4}{dt^4} q(z,t) \right) = 0 \quad (2)$$

Ahol; ρ_a – az oszlop anyagának sűrűsége,
 $A(z)$ – az oszlop keresztmetszetének függvénye az oszlop hossza mentén,
 $I_v(z)$ – az oszlop másodrendű keresztmetszeti nyomatékának függvénye a v -edik tengelyre vonatkozóan, az oszlop hossza (z) mentén ($v=x, y$),
 E – az oszlop anyagának a rugalmassági modulusa,
 l_o – az oszlop hossza.

Az oszlop lengését jellemző $q(z,t)$ függvényt egy a helyfüggvénynek; $u(z)$ és egy az időfüggvénynek; $\sin(\alpha t)$ a szorzataként keressük:

$$q(z,t) = u(z) \cdot \sin(\alpha \cdot t) \quad (3)$$

Az $u(z)$ függvényt a kitérésre vonatkozó, közönséges differenciál-egyenlet segítségével lehet meghatározni:

$$I_v(z) \cdot E \cdot \left(\frac{d^4}{dt^4} u(z) \right) - \alpha^2 \cdot \rho_a \cdot A(z) \cdot u(z) = 0 \quad (4)$$

Ennek megoldása nem tekinthető egyszerű feladatnak, ezért az $u(z)$ függvényt olyan polinommal közelítjük, amely kielégíti az egyenletünket és a hajlított rúdra vonatkozó peremfeltételeket is, esetünkben:

$$u(z) = z^2 \cdot (z - 3 \cdot l_0) \quad (5.)$$

A fenti összefüggések felhasználásával meghatározhatjuk a hajlító lengésekre vonatkozható alap-harmonikus saját-körfrekvenciát:

$$\alpha_v = \sqrt{\frac{I_{1v}}{I_2 + m_r \cdot u(l_0)^2}} \quad (6.)$$

Ahol;

$$I_{1v} = \int_0^{l_0} I_v(z) \cdot E \cdot \left(\frac{d^2 u(z)}{dz^2} \right)^2 dz \quad (7.)$$

illetve;

$$I_2 = \int_0^{l_0} \rho_a \cdot A(z) \cdot u(z)^2 dz \quad (8.)$$

A jellemző alap-harmonikus sajátfrekvencia:

$$f_v = \frac{\alpha_v}{2 \cdot \pi} \quad (9.)$$

A rendszer dinamikus stabilitását a rezonancia-nagyítással jellemezhető a legjobban:

$$\eta_v = \left| \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\alpha_v} \right)^2} \right| \quad (10.)$$

A rezonancia-nagyítás megmondja, hogy a statikus erőjáték által meghatározott alakváltozás hány-szorosa lesz a dinamikus alakváltozás. Rezonanciáról beszélhetünk akkor, ha a rezonancia-nagyítás értéke 2-nél nagyobbra adódik.

A keresztmetszet és annak másodrendű nyomatéka a 3. ábra szerinti lineáris függvénykapcsolatokkal jellemezhető az oszlop hossz tengelyéhez kötött z koordináta függvényében, amiket az integrálásnál figyelembe kell venni.

A számításokat a MathCAD programrendszerrel oldottuk meg, és az 1. táblázatban foglaltuk össze az eredményeket. A táblázatban meghatároztuk az oszlopra z tengelyére merőleges x és y tengelyekre vonatkozó hajlító lengések frekvenciáit, ha a minden tömeget figyelembe veszünk (1), ha az oszlop tömegét elhanyagoljuk (2), illetve a kötélzetet és a rajta lévő tömegeket is elhanyagoljuk (3). A számításokat kétféle lemezvastagságnál (v=6 és 7 mm) végeztük el, mert a falvastagság-mérések azt igazolták, hogy valahol a két érték közé eshet a valóságos falvastagság, ugyanis a konstrukció huzamos ideig leszerelve raktárban állt, ahol az időjárási

viszontagságok miatt a falvastagság csökkent. Megállapítható, hogy az x és az y tengely körüli hajlító lengések sajátfrekvenciája – a terhelési állapot függvényében változnak – az alábbi intervallumokban:

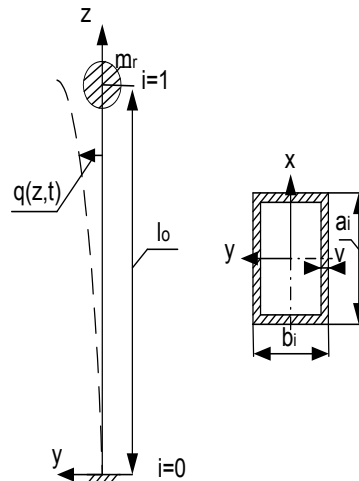
A lemez vastagsága (v) (mm)	A mérésel meghatározott frekvenciasávok (f _x és f _y) (Hz)
6	2,27 ≤ f _x ≤ 2,54
	3,09 ≤ f _y ≤ 3,45
7	2,42 ≤ f _x ≤ 2,72
	3,29 ≤ f _y ≤ 3,69

A gerjesztési körfrekvenciát a névleges kötélsebesség (v=1,5 m/s) és a támasztógörgő átmérője (D=0,22 m) alapján határozzuk meg:

$$\omega = 2 \cdot \frac{v}{D} \quad (12.)$$

A rezonancia-nagyítás legnagyobb értékét a legkisebb frekvenciánál, míg a legkisebbet a legnagyobbánál kapjuk. A rezonancia-nagyítás értéke az 1,53-11,57 érték között változik a számításaink szerint, vagyis rezonáns jelenséggel kell számolni. Az 5. ábrából is megállapítható, hogy 2,5 Hz környékén jelentős a rezgés y irányú intenzitása, vagyis az oszlop a haladás irányában végez jelentős (szemmel is jól érzékelhető) lengéseket.

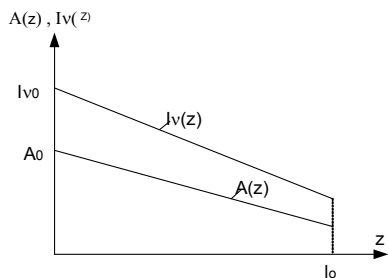
Az oszlop tetején elhelyezett piezoelektromos sebesség-érzékelőkkel meghatározott jellemző diagrammokat szemlélteti a 4. ábra, amelyeket felhasználunk a rezgésekre jellemző frekvenciákat Fourier-transzformációval történő meghatározására (5. ábra). Az sebességet mm/sec dimenzióban ábrázoltuk. A v_x és a v_y frekvenciamenetének elemzése is alátámasztja a számításokkal meghatározott frekvenciák megjelenését.



i	0	1
a _i (mm)	750	334
b _i (mm)	500	234
v (mm)	6 ill. 7	
l ₀ (mm)	8400	

A kijelölt keresztmetszetek jellemző méretei

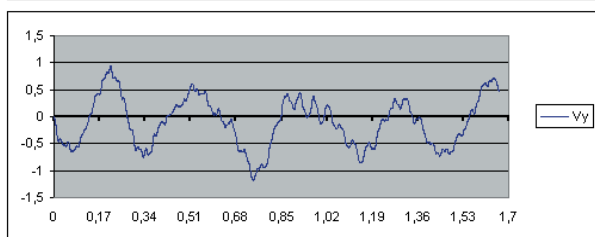
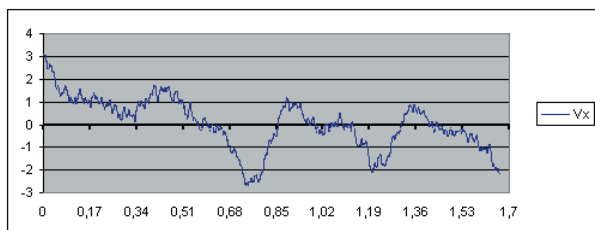
2. ábra. A hajlító lengéseknek kitett oszlop jellemző méretei és egyszerűsített rezgéstani modellje



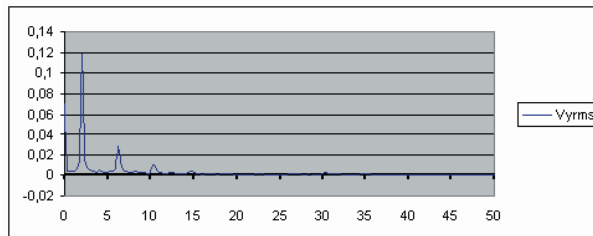
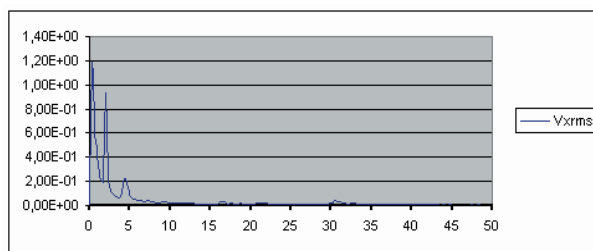
3. ábra A Keresztmetszet (A) és a keresztmetszet másodrendű nyomatéka függvényei a rúd hossz tengelyéhez kötött koordináta (z) függvényében

1. táblázat

Terh. kód	$v=6$ mm			$v=7$ mm		
	f_x (Hz)	f_y (Hz)	m_r (kg)	f_x (Hz)	f_y (Hz)	m_r (kg)
1	2,27	3,09	1256	2,42	3,29	1273
2	2,35	3,19	1170	2,50	3,39	1187
3	2,31	3,13	1213	2,46	3,34	1230
1	2,36	3,21	1154	2,53	3,44	1154
2	2,45	3,32	1068	2,62	3,56	1068
3	2,41	3,26	1111	2,58	3,50	1111
1	2,54	3,45	982	2,72	3,69	982
2	2,54	3,45	982	2,72	3,69	982
3	2,54	3,45	982	2,72	3,69	982

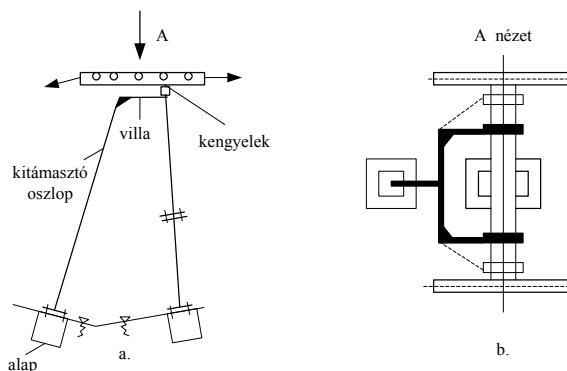


4. ábra Az oszlop tetején elhelyezett piezoelektromos érzékelővel mért sebességkomponensek időbeni alakulása



5. ábra A rezgések Fourier-transzformációval meghatározott, sebességamplitúdó-frekvencia függvénymenete

A hajlító- és csavaró lengések csökkentése az oszlop-szerkezet kitámasztásával egyszerűen megoldható és ezzel a horpadási kritériumok és teljesíthetőek. A kitámasztó rendszer elvét a 6. ábra szemlélteti. A kitámasztó rendszer áll egy villából, amely a konzolokhoz kengyelekkel csavaros kötással rögzítik. A kitámasztó oszlop a villa közepén van mereven bekapcsolva, hogy a járulékos csavarást és a hajlítást képes legyen felvenni. A kitámasztó oszlop egy betonlaphoz, az eredeti oszlop bekötéshez hasonlóan kapcsolódik. A villa a csavarást, az oszlop a bólogató hajlítást veszi fel az eredeti oszloppal együtt dolgozva.



6. ábra A tartóoszlop elhangolásának egy lehetséges módja

IRODALOMJEGYZÉK

- [1.] LUDVIG, GY.: Gépek dinamikája, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1973.
- [2.] MUTNYÁNSZKY, Á.: Szilárdságtan, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1980