

A dunaújvárosi Pentele híd terhelésvizsgálatának támogatása földi lézerszkenneléssel

*Dr. Lovas Tamás¹–dr. Barsi Árpád¹–Polgár Attila³–
Kibédy Zoltán³–dr. Detrekői Ákos¹–dr. Dunai László²*

¹ Fotogrammetria és Térinformatika Tanszék, BME

² Hidak és Szerkezetek Tanszék, BME

³ Piline Kft.



A modern geodéziai, távérzékelési eljárások létjogosultságukat konkrét alkalmazásokon keresztül bizonyíthatják és ezáltal biztosíthatják elterjedésüket. A földi lézerszkennerek az utóbbi években egyre nagyobb teret nyernek a hazai geodéziai felmérésekben is. Jellemzően homlokzatfelmérésre, régészeti alkalmazásokhoz, gépészeti szerkezetek felméréséhez használják. A Fotogrammetria és Térinformatika Tanszéken már több diplomamunka született a témában érdekes alkalmazásokkal és vizsgálatokkal. Egy 2007-es diplomamunka kapcsán vizsgáltuk meg a földi lézerszkennerek alkalmazhatóságát hidak terhelésvizsgálatában, melyet a 2007 nyarán átadott dunaújvárosi Duna-híd (Pentele híd) példáján mutatunk be.

1. Bevezetés

Hidak terhelésvizsgálata során a hagyományos eljárásokkal a főtartószerkezet függőleges mozgását, a szerkezet egyes (előre kijelölt) pontjainak elmozdulását és – szintén előre meghatározott pontokban – a nyúlását mérik. A főtartók függőleges mozgását felsőrendű szintezéssel, a szerkezet pontjainak térbeli mozgását általában geodéziai mérőállomással, míg kijelölt pontokban a szerkezet alakváltozását általában elektromos nyúlásmérő ellenállások (bélyegek) segítségével végzik. Cikkünkben bemutatjuk, hogy a földi

lézerszkenneléses eljárás milyen módon támogathatja a terhelésvizsgálatot, milyen többlet információkat nyerhetünk a lézeres felmérésből, és hogyan használható ez a technológia a továbbiakban a hagyományos módszerek mellett hasznos kiegészítőként, végül milyen korlátai vannak az új módszernek.

Leírást adunk a 2007. június 28-i terhelésvizsgálat lézerszkenneléses méréséről és a felmérés eredményeként kapott adatfeldolgozásról. A tanulmányt az eredmények értékelésével, kitekintéssel és javaslatokkal zárjuk.

2. A lézerszkennelés

A lézerszkennelés meglehetősen új adatnyerési eljárásnak számít: az 1990-es évek második felétől alkalmazzák széles körben. A szkennerek lézersugarat bocsát ki a megadott irányban, egy tárgyponttól visszaverődik, majd visszaérkezik a műszerbe. A kibocsátás és a visszaérkezés között eltelt idő és a sugár irányának ismeretében a műszer kiszámítja a pont térbeli helyzetét egy adott koordináta-rendszerben. Ez még nem tenné speciálissá, hiszen sok más műszer is időméréses távmérést alkalmaz. A módszerrel azonban automatikusan másodpercenként több tízezer pontot is meghatározhatunk akár centiméteresnél jobb pontossággal. Ez óriási adatmennyiséget és nagy pontsűrűséget jelent rendkívül rövid idő alatt.

A kiemelkedő pontsűrűség és az elérhető pontosság miatt a földi lézerszkennelés felhasználási köre rendkívül sokrétű: építészet, régészet, mérnöki visszafejtés (reverse engineering).

A Piline Kft. által rendelkezésünkre bocsátott RIEGL LMS-Z420i típusú lézerszkennér gyári adatai a következők:

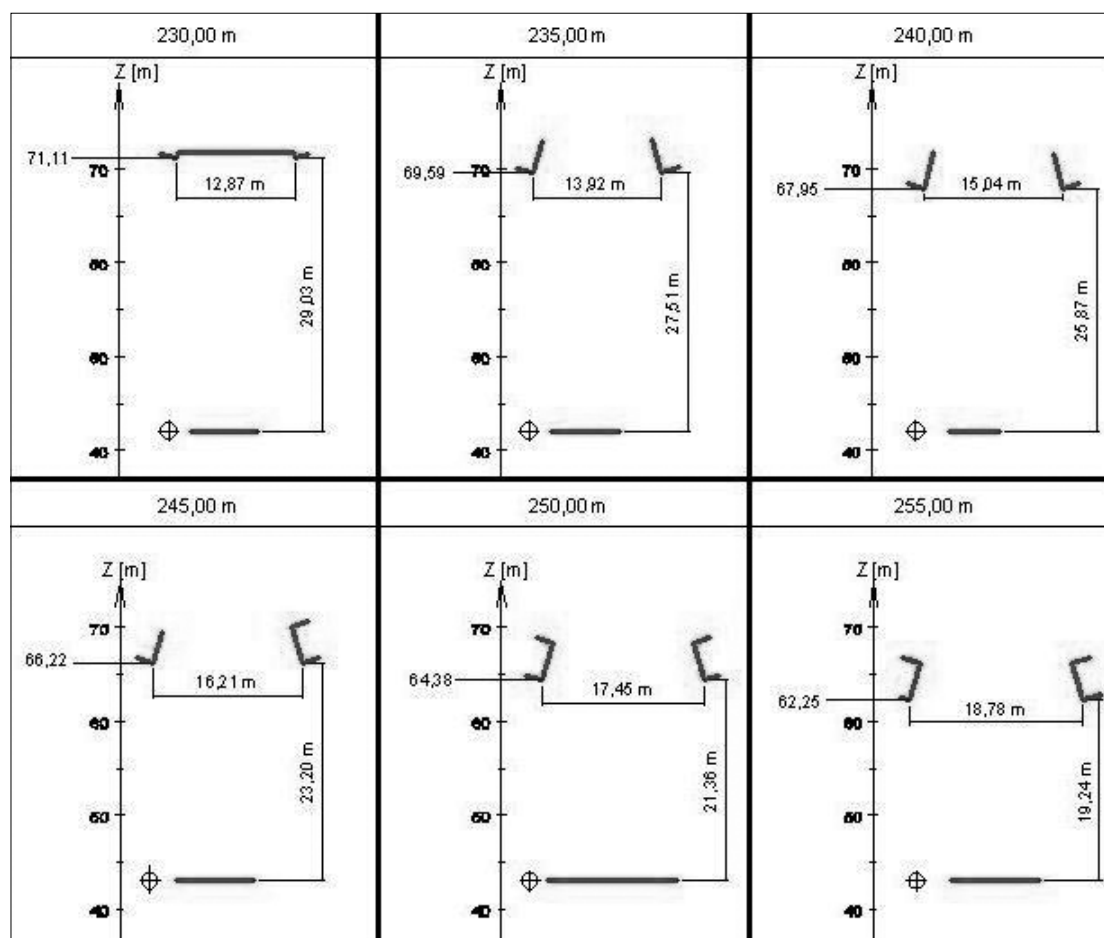
Mérési távolság	2 és 800 m között
Mérési pontosság	5 mm
Adatrögzítés sebessége	12 000 pont/s
Lézersugár hullámhossza	~1050 nm
Függőleges látószög	0°–80°, legkisebb lépésköz: 0,008°
Vízszintes látószög	0°–360°, legkisebb lépésköz: 0,01°

A Fotogrammetria és Térinformatika Tanszéken egy korábbi diplomamunkában [Maksó, 2006] ennek a műszernek a pontosságát vizsgáltuk deformációmérésben és megállapítást nyert, hogy a gyár által megadott ± 5 mm-es távmérési középhiba reálisnak mondható.

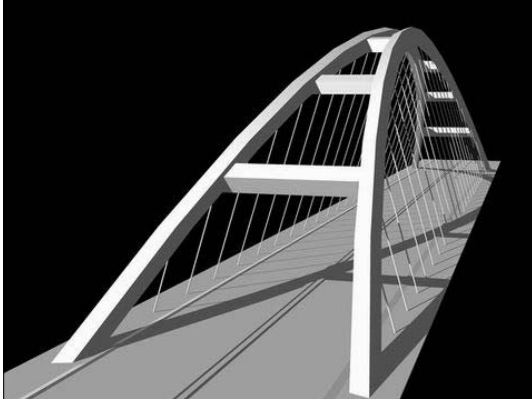
A méréshez használt típus egy professzionális, nagyfelbontású kamerával (Nikon D-100) van ellátva, így szkenneléskor digitális fotók is készülhetnek. Ezeket később a pontfelhőre rávetíthetjük, amivel fotorealistikus hatás érhető el.

3. A mérés

2007. áprilisban felmértük az épülő, akkor már végleges helyzetében álló dunaiújvárosi Pentele hidat. A három álláspontból történt felméréssel a híd jellemző pontjain ellenőrző méréseket hajtottunk végre (1. ábra).



1. ábra Keresztszelvényekben végzett tesztmérések (2007. április)



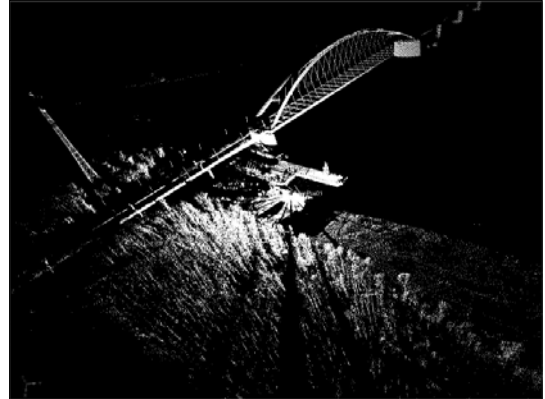
2. ábra Lézerszkennelésből előállított virtuális hídmodell megjelenítése

A felmérés során nyert pontfelhő lehetővé tette a híd 3D modelljének előállítását (2. ábra).

Ezen előzetes eredményekre alapozva merült fel a terhelésvizsgálat földi lézerszkenneléses támogatásának lehetősége, melyet a következőkben mutatunk be.

3.1 Terhelésvizsgálat során végzett lézerszkenneres mérések

A dunaujvárosi Pentele híd két ártéri hídból és egy mederhídből áll, teljes hossza 1682 méter. Az ártéri hidak folytatólagos többtámaszú kialakításúak, a mederhíd pedig kosárfül alakú ívekre kábelekkel függesztett merevítőtartós szerkezet. A mederhíd támaszköze 307,8 méter, amely ebben a kategóriájában világrekordnak számít. A lézerszkenneres méréseink csak az ívhídra korlátozódnak. A mederhíd első statikus terhelésvizsgálata 2007. június 28-án, 21 órakor kezdődött és mintegy 9 órán keresztül tartott. Az egyes teherállásokban a hidat 20–30 percig terhelik (ezalatt végzik el a geodéziai méréseket), a lézerszkenneres mérésre is ez jelentett időkorlátot. Mivel csak egy műszer állt rendelkezésre, ezért olyan álláspontot kellett kiválasztani, melyről a híd jellemző pontjai láthatók és mérhetők. Az álláspont kiválasztásánál figyelembe kellett venni, hogy alapvetően a hagyományos módszereket kiegészítendő mérési technológia bemutatása a cél, így a híd olyan pontjainak a felmérése szükséges, melyet hagyományos módszerekkel nem, vagy csak korlátozottan (egyes pontokban) mérhetnek. Figyelembe véve az egyes teherállásokban rendelkezésre álló időt és a műszer mérési tartományát, a Duna bal partján (Du-



3. ábra Panoráma szkennelés

navecsén) jelöltük ki az álláspontot; ott, ahol a beusztatás előtt a hidat összeszerelték (lásd hátsó belső borítón).

A mérés panoráma-szkenneléssel kezdődött, ahol mérsékelt felbontással megtörtént a terület felmérése. Ezen az állományon ki lehetett jelölni a felméréendő területet, melynek ismeretében a szkennner szoftvere ki tudta számolni, hogy adott felbontással történő méréshez mennyi időre van szükség (3. ábra).

A lézerszkennelés egyes méréseinek paramétereit foglalja össze az 1. táblázat.

1. táblázat

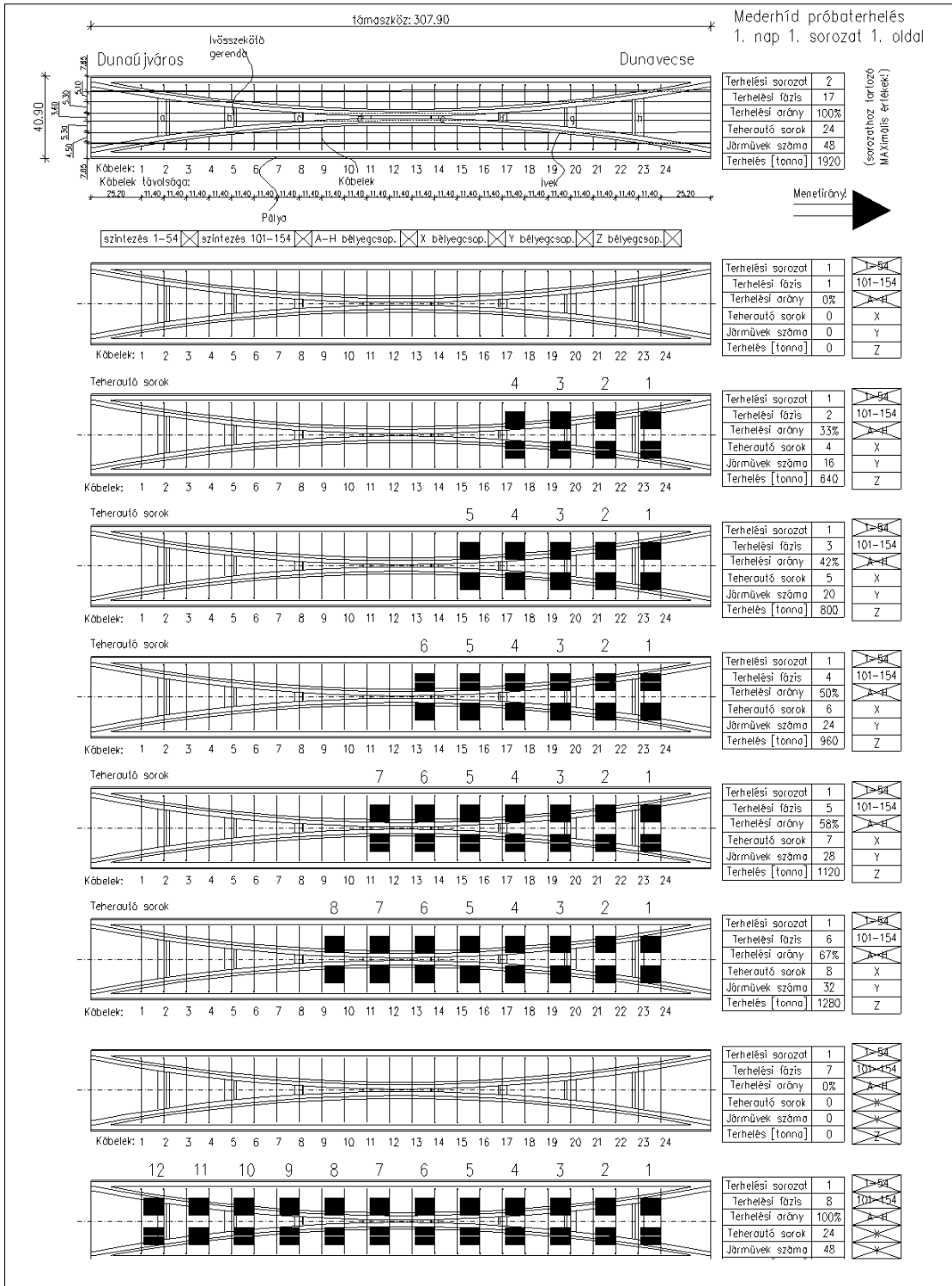
A szkennelés során alkalmazott pontsűrűséget befolyásoló paraméterek

Szkennelés ideje (mérésenként)	15' 45"
Pontok száma (mérésenként)	~290 000
Szkennelési tartomány (vízszintesen)	~50°
Szkennelési tartomány (függőlegesen)	~17°
Szögfelbontás (vízszintes és függőleges)	0,017°

3.2 A lézerszkenneres mérés eredményei

Lézerszkenneléssel a terheletlen állapot felmérése után (első teherállás – nullmérés) 6 teherállásban megtörtént a híd felmérése (4. ábra).

Mivel az egyes teherállások viszonylag rövid ideig tartottak és nem voltak megismételhetők, csak egy álláspontból történt mérés csökkentett



4. ábra A 2007. június 28-i próbaterhelés első 8 teherállásának vázlata.
A fekete téglalapok az azonos – 40 tonna tömegű – tehergépkocsik helyzetét mutatják.

2. táblázat

Az ív és a merevítőtartó egyes pontjainak elmozdulásai a nullméréshez képest

Ív					
Szelvény	Teherállás (elmozdulások m-ben)				
	2	3	4	6	7 (üres)
298	-0,116	-0,157	-0,121	-0,128	0,000
293	-0,137	-0,157	-0,133	-0,120	-0,036
288	-0,148	-0,226	-0,189	-0,156	-0,067
283	-0,222	-0,243	-0,237	-0,191	-0,068
278	-0,230	-0,267	-0,265	-0,221	-0,051
273	-0,213	-0,209	-0,254	-0,217	-0,061
268	-0,263	-0,317	-0,314	-0,258	-0,070
263	-0,293	-0,339	-0,338	-0,264	-0,050
258	-0,325	-0,333	-0,335	-0,282	-0,051
253	-0,330	-0,364	-0,349	-0,290	-0,054
248	-0,332	-0,369	-0,364	-0,300	-0,062
243	-0,326	-0,339	-0,385	-0,291	-0,058
238	-0,352	-0,397	-0,384	-0,321	-0,071
233	-0,353	-0,408	-0,390	-0,311	-0,067
228	-0,360	-0,390	-0,406	-0,336	-0,060
223	-0,362	-0,402	-0,382	-0,358	-0,068
218	-0,315	-0,397	-0,404	-0,344	-0,080
213	-0,285	-0,330	-0,334	-0,299	-0,030
208	-0,301	-0,363	-0,356	-0,329	-0,061
203	-0,305	-0,325	-0,343	-0,328	-0,057
198	-0,305	-0,307	-0,371	-0,358	-0,072
193	-0,241	-0,317	-0,357	-0,340	-0,050
188	-0,207	-0,308	-0,321	-0,304	-0,058
183	-0,208	-0,293	-0,320	-0,336	-0,113
178	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Merevítőtartó					
Szelvény	Teherállás (elmozdulások m-ben)				
	2	3	4	6	7 (üres)
298	-0,137	-0,075	-0,076	-0,116	0,000
293	-0,143	-0,103	-0,091	-0,095	-0,034
288	-0,188	-0,192	-0,156	-0,132	-0,091
283	-0,204	-0,217	-0,237	-0,143	-0,094
278	-0,228	-0,240	-0,259	-0,218	-0,066
273	-0,276	-0,304	-0,309	-0,240	-0,111
268	-0,304	-0,348	-0,347	-0,320	-0,104
263	-0,298	-0,351	-0,352	-0,281	-0,102
258	-0,329	-0,370	-0,331	-0,288	-0,114
253	-0,340	-0,374	-0,341	-0,320	-0,134
248	-0,335	-0,358	-0,346	-0,342	-0,112
243	-0,340	-0,397	-0,347	-0,291	-0,124
238	-0,364	-0,419	-0,382	-0,336	-0,140
233	-0,356	-0,416	-0,382	-0,341	-0,136
228	-0,365	-0,407	-0,377	-0,342	-0,124
223	-0,363	-0,402	-0,354	-0,324	-0,117
218	-0,362	-0,387	-0,362	-0,302	-0,115
213	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
208	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
203	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
198	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
193	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
188	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
183	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
178	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

felbontással. Így az elmozdulások két, a szkenerhez közel eső szerkezeti elem (az ív és a merevítőtartó alsó éleinek) meghatározott pontjaira lettek meghatározva.

A lézerszkennelt pontfelhő virtuálisan tetszőlegesen körüljárható, nagyítható, elemezhető. Mivel csak egy álláspontból történtek mérések, ezért a szerkezet által kitakart egyéb szerkezeti elemek nem látszanak, ez a hiba több álláspontból történő felméréssel kiküszöbölhető. A cikk 5. szakasza tartalmaz javaslatokat földi lézerszkenneres mérés alkalmazására hidak próbateljesítéséhez.

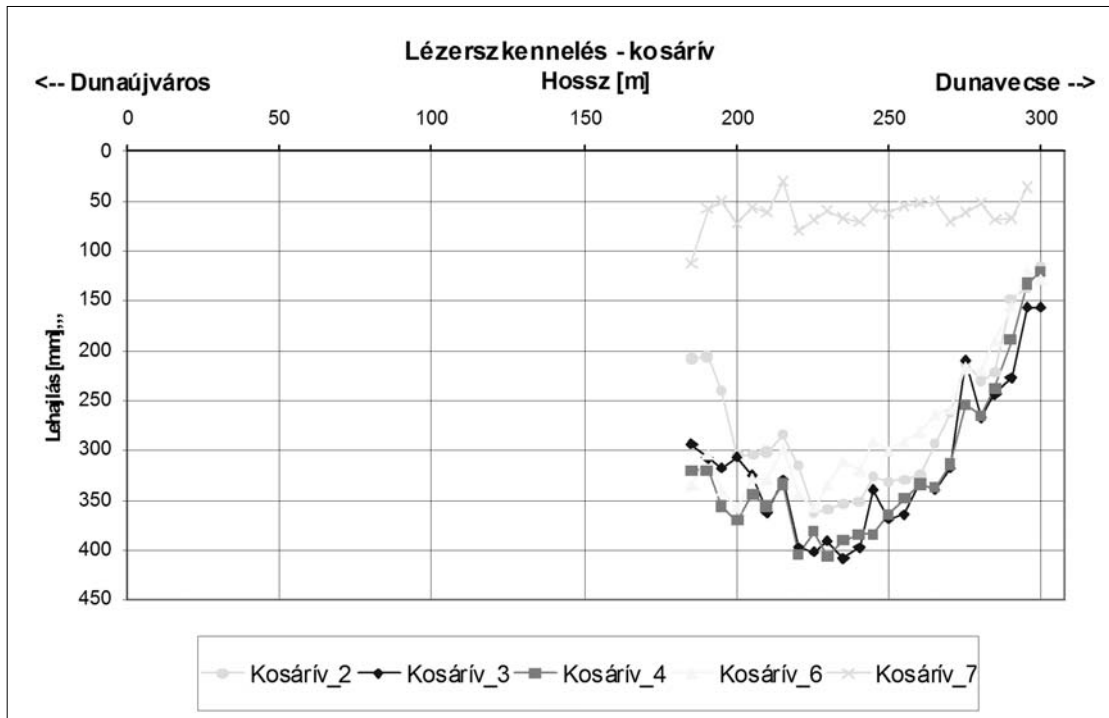
Mivel nem volt lehetőség referenciamérésekkel a szkennelt állományokat egységes vetületi rendszerbe transzformálni, így minden mérést relatív koordináta-rendszerben kell értelmezni. Az

ív egyes pontjainak meghatározásához a szelvényezés kezdőpontjának a mért (északi) ív és a merevítőtartó dunavecsei csatlakozási pontját választottuk.

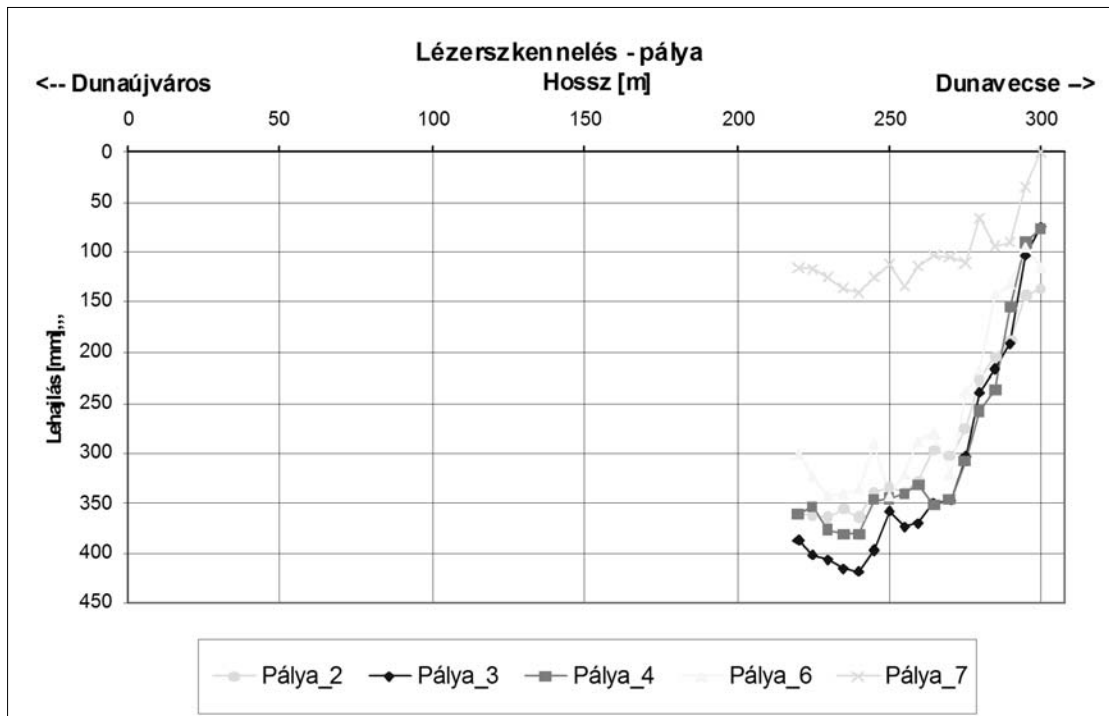
Az alábbi táblázatok (2. táblázat) az ív és a merevítőtartó elmozdulásait tartalmazzák a terheletlen állapothoz képest.

Az elmozdulási görbékét ábrázolva jól láthatóak az egyes teherállások okozta különböző elmozdulási értékek (5. és 6. ábra).

A 2. táblázatban és a 6. ábrán a 213-as szelvénytől látható nullás értékek magyarázata az, hogy a terheletlen állapot mérésekor a híd középső részéből sajnálatos módon kimaradt egy közel 30 méteres szakasz. Az ellenőrző mérésekhez elegendő pontsűrűség így is csak a híd szkenerhez közel eső feléről adódott.



5. ábra Az ív pontjainak elmozdulásai az egyes szelvényekben



6. ábra A merevítőtartó pontjainak elmozdulásai az egyes szelvényekben

4. Mérési eredmények értékelése

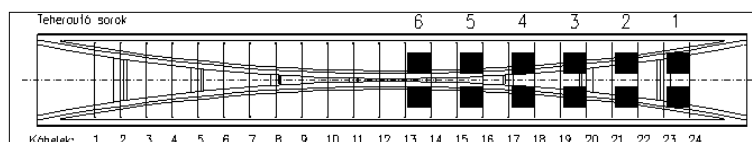
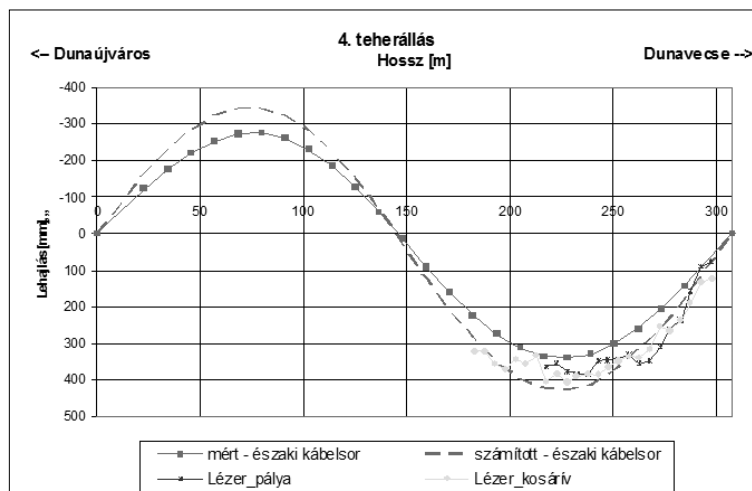
A lézerszkenneres felmérés adatállományából számított szerkezeti elmozdulások (6. ábra) korrelálnak a hagyományos mérési módszerrel (felsőrendű szintezéssel) számított értékekkel (7. ábra); mindkét eljárással ~35 cm-es maximális lehajlás adódott a 4. teherállásban, ahol a legnagyobb mértékű elmozdulások adódtak.

Itt szükséges ismét hangsúlyozni, hogy a felsőrendű szintezést a hídpályán végezték, a merevítőtartó valamennyi kábel-lehorgonyzása mellett rögzített mérőhelyeken, lézerszkenneléssel viszont a merevítőtartó szélének elmozdulása volt mérhető.

A lézerszkennelt állományból levezetett ábrákon látható ingadozás nem a mérési pontosság, hanem a kényszerűen csökkentett pontsűrűség eredménye. Az így előállt állományra nem lehet szabályos síkokat és éleket illeszteni. Ennek ellenére a kapott lehajlási görbe trendje és az elmozdulások nagysága mutatja a mérés helyességét.

A 4-es teherálláshoz hasonlóan a 7-es (ismételten „üres”) teherállásra is elvégezhető az összehasonlító elemzés, mely a maradó deformációkat mutatja (8. ábra).

A hagyományos mérési eljárásoktól eltérően a lézerszkennelt állományban a szerkezet tetszőleges (az állásponttól látható) pontjáról kapunk információkat. Egy mérési állományból, egy rendszerben vizsgálható az ív, a merevítőtartó, a kábelek és egyéb szerkezeti elemek elmozdulása is. A mérendő pontokat nem szükséges előre meghatározni, azok kiválasztására utólag is lehetőség van. Előzetes tervezés természetesen szükséges, hiszen az adott pontok láthatóságát az álláspont gondos kiválasztásával kell biztosítani. A hagyományos mérési eljárásokkal összevetve a lézerszkennelés legfőbb hátránya az elérhető 5 mm-es pontosság, mely nem versenyezhet a felsőrendű szintezés mérési pontosságával. A lé-

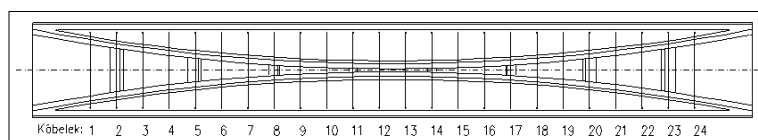
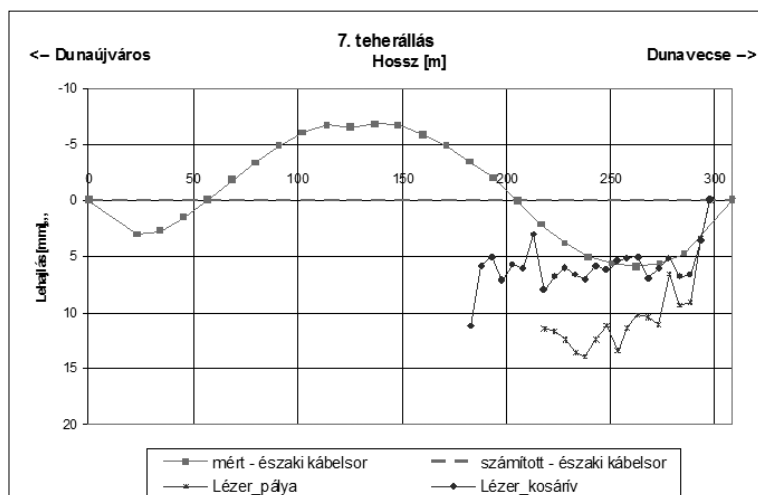


7. ábra A merevítőtartó felsőrendű szintezéssel és lézerszkenneléssel meghatározott lehajlása, a számított lehajlási értékek és az ív lézerszkenneléssel meghatározott lehajlása a 4-es teherállásban (alul a teherállás vázlatja)

zerszkennelésnek tehát nem a hagyományos mérési eljárások kiváltása lehet a célja, hanem azok kiegészítése.

5. Javaslat a lézerszkennelés alkalmazására szerkezetek deformációs vizsgálatához

Mivel a dunaújvárosi Pentele híd terhelésvizsgálata a hagyományos mérési eljárásokhoz igazodott, a lézerszkennelés során a felbontást és így közvetve a mérési pontosságot is érintő kompromisszumokra volt szükség. Lényegesen jobb eredmény érhető el több szkennerek alkalmazásával és az állományok utólagos egyesítésével. A szkennerek magas ára (~20 millió forint) azonban ezt egyelőre nem teszi lehetővé. Egy szkennerral is lehet fokozni a pontsűrűséget és így közvetve a mérési pontosságot is, ha a teherállások ideje meghosszabbítható és így a mérés szögfelbontása növelhető. További lehetőség a nagy pontsűrűség elérésére és ezáltal közvetve a pontosság növelésére, ha nem a teljes a szerkezetet, hanem annak csak egy kiválasztott szakaszát mérjük fel.



8. ábra A merevítőtartó felsőrendű színtezéssel lézerszkenneléssel meghatározott lehajlása, a számított lehajlási értékek és az ív lézerszkenneléssel meghatározott lehajlása (az előzőtől eltérő függőleges skálázás!) a 7-es teherállásban (alul a teherállás vázlatja)

A szerkezet belső pontjairól (ív belső éleiről, keresztmerevítőkről, pályalemez felső részéről) magán a szerkezeten célszerű méréseket végezni, ez azonban rendkívül körülményes a terhet alkotó teherautók által okozott jelentős kitérés miatt. Ha a szkennert a hídon áll, akkor biztosítani kell az összes teherállásban mozdulatlanak tekinthető referenciapontok (pl. a parton lévő pontok) felmérését is. A szkennert felmérési tartománya és a reflektorok (rendkívül jó visszaverési képességű, utólagosan az állományból automatikusan kiválasztható előre jelölt pontok) alkalmazása ezt éjszakai mérésnél is lehetővé teszi.

A módszer hídpróbaterhelésben való kipróbálását sikeresnek és biztonságosnak ítéljük; további vizsgálatok és pontosítások után az ilyen típusú mérések hatékony eszközévé válhat.

Supporting the deformation measurement of the Pentel bridge by laserscanning

Lovas, T.–Barsi, Á.–
Polgár, A.–Kibédy, Z.–
Dretkői, Á.–Dunai, L.

Summary

The state-of-the-art geodetic and remote sensing techniques can prove its potential through particular applications. The terrestrial laser-scanner broadens its application field even in Hungarian surveying projects.

This paper deals with the investigation of laserscanning in deformation measurements of structures, such as bridges. It discusses the processing of laserscanned point cloud acquired during the deformation measurement of the Pentele bridge.

IRODALOM

- Polgár Attila (2007): Híd szerkezet terhelésvizsgálatának támogatása földi lézerszkenneléssel, diplomaterv, p. 45
- Domanovszky Sándor (2007): Tudósítás a Dunaújvárosi Duna-híd acél felszerkezetének építési munkálatairól, Magész Acélszerkezeti szövetség, IV. évf. 1. szám, pp. 24–42.
- Horváth Adrián (2007): A tervező a híd beüzemeléséről, Hídépítők melléklet, VÉ-KA, XXXVI. évf. 1. szám, pp. 10–13.
- Kovács Ervin (2006): Tárgyrekonstrukció lézerszkennelés alkalmazásával, diplomaterv, p. 87
- Maksó Máté (2006): Mérnöki szerkezetek deformációjának meghatározása földi lézerszkenneléssel, diplomaterv, p. 45
- Wikipedia (2007): Reverse engineering
www.laserscan.hu
www.piline.hu