

A Megyeri híd terhelésvizsgálatának támogatása földi lézershakenneléssel

Dr. Lovas Tamás¹ – Berényi Attila^{1,3} – dr. Barsi Árpád¹ – dr. Dunai László²

¹ Fotogrammetria és Térinformatika Tanszék, BME

² Hidak és Szerkezetek Tanszéke, BME

³ Burken Kft.



A Fotogrammetria és Térinformatika Tanszéken 2006 óta foglalkozunk a földi lézershakenneres felmérés mérnökgeodéziai alkalmazásának vizsgálatával. A Hidak és Szerkezetek Tanszékével a kezdetektől fogva együttműködünk, mind a laborkísérletek, mind a terepi mérések során. 2007-ben a Geodézia és Kartográfia oldalain is beszámoltunk a dunájvárosi Pentele híd terhelésvizsgálata során végzett lézershakenneres felmérésünkről (Lovas et al, 2007).

A közelmúltban átadott Megyeri híd terhelésvizsgálatát szintén a Hidak és Szerkezetek Tanszék munkatársai végezték; a Pentele híd sikeres lézershakennelésének eredményeként a Fotogrammetria és Térinformatika Tanszéknek a Burken Kft.-vel szoros együttműködésben alkalma volt ismét méréseket végezni.

Cikkünkben bemutatjuk továbbfejlesztett mérési módszerünket, a feldolgozás lépéseit és eredményeit, valamint javaslatot adunk a technológia hasonló területen való jövőbeni alkalmazására.

Bevezetés

A dunájvárosi Pentele híd terhelésvizsgálata során a különböző terhelési állapotokat egy lézershakennerekkel, a Duna bal partjáról mértük. Ahogy a mérésről írt cikkekből beszámoltunk róla, a híd állásponthoz közeli elemeiről készült értékelhető eredmények, melyek jól korreláltak a hagyományos geodéziai mérések eredményeivel. A műszertől távolabbi pontokon azonban a távolság és a kedvezőtlen lézershakennerek beesési szögek miatt kisebb pontsűrűség és a kiértékelést zavaró lézershakennerek jelzőrődés jelensége lépett fel, mely az

adott részeken megnehezítette a híd szerkezeti elemeinek modellezését és így az elmozdulások meghatározását is.

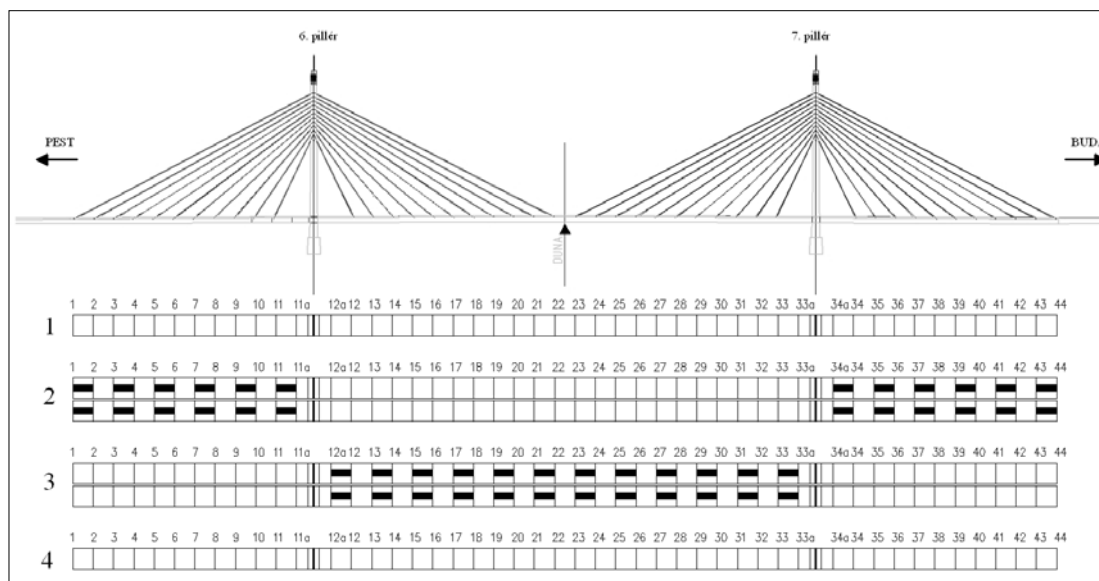
A Megyeri híd esetében a terhelésvizsgálat különböző teherállásait két műszerrel egyidejűleg rögzítettük, a mérés előtt az álláspontokat a hídon dolgozó geodéta munkatársak segítségével meghatároztuk.

A felmérés

Hidak terhelésvizsgálata során a hagyományos eljárásokkal általában a főtartószerkezet függőleges mozgását, a szerkezet egyes (előre kijelölt) pontjainak elmozdulását és – szintén előre meghatározott pontokban – a nyúlását mérik. A Megyeri híd főtartóinak függőleges mozgását felsőrendű szintezéssel, a befolyási (északi) és kifolyási (déli) oldalon 10–10 műszerállásban Zeiss Ni007 és MOM Ni A31 típusú műszerekkel mérték. A közel 100 m magas pilonok hídtengely irányú mozgását geodéziai mérőállomással, a pilonok tején elhelyezett 2–2 mérőbélyegre való méréssel határozták meg. Ezen kívül kijelölt pontokban a szerkezet alakváltozását elektromos nyúlásmérő ellenállások (bélyegek) segítségével rögzítették.

A lézershakennelési módszer továbbfejlesztésével a híd mindkét végéről nagy pontsűrűségű, ezáltal pontosabban kiértékelhető pontfelhő nyerhető. Sajnos a természeti adottságok miatt egyik oldalon sem volt lehetőség a hídtól távolabb eső, stabil, a hidra jó rálátást biztosító álláspontot találni.

Az egyik műszert (Riegl Z420i) a pesti oldalon, a másikat (Riegl Z390i) a Szentendrei szige-



1. ábra Lézerszkenneléssel felmért teherállások (1–4)

ten helyeztük el, 50, illetve 35 méter (merőleges) távolságra a hídtól, a mederhíd szélei közelében.

A mérést 2008. augusztus 23-án este 19 órától 22 óráig végeztük. A 15 teherállásból lézerszkenneléssel csak az első 4 teherállás felvétele történt meg (1. ábra); a heves esőzés miatt a mérést meg kellett szakítani.

Az egyes teherállások:

1. nullmérés, terheletlen állapot,
2. a híd terhelése a pilonok és a part közti szakaszon (12–12 db 42 tonnás teherautóval),
3. a híd terhelése a pilonok között (24 db teherautóval),
4. a maradó alakváltozás mérése, terheletlen állapot.

A felmérés során a két műszer az 1. táblázatban látható paraméterekkel végezte a felmérést. A pontok számára és pontsűrűsége kiható felbontás az egyes teherállásokban a pályalemez mozgásának mérésére alkalmazott felsőrendű szintezés rendelkezésére álló idő alapján lett beállítva.

Eredmények kiértékelése – vizsgálat a pontfelhőkön

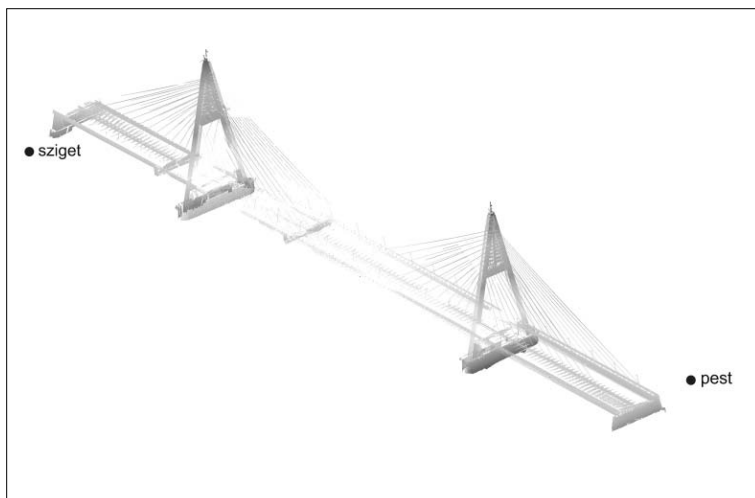
A lézerszkennelés eredménye nyers pontfelhő (2. ábra), melyre általában a későbbi vizsgálatok, elemzések során geometriai elemeket illesztnek és előállítják a felmért objektum sík vagy térbeli modelljét. A pontok nagy számának és a felbontásnak köszönhetően azonban a feldolgozatlan pontfelhők térbeli megjelenítése is lehetőséget ad alapvető mozgásvizsgálati vagy deformációs tendenciák megállapítására (3–4. ábra).

Az alább bemutatott nyers eredmények előállítását megelőzi egy sokszor rendkívül időigényes munkafolyamat, a pontfelhő szűrése és tisztítása. Ezen folyamat során csak a felméréndő objektumhoz tartozó helyes pontok kiválogatása történik meg. Ezt a munkafolyamatot a Tanszék korábbi kutatásai és munkái során már kellően dokumentáltuk, ezért jelen cikkünkben nem közlünk részleteket (Polgár 2007).

1. táblázat

A lézerszkennelések paraméterei

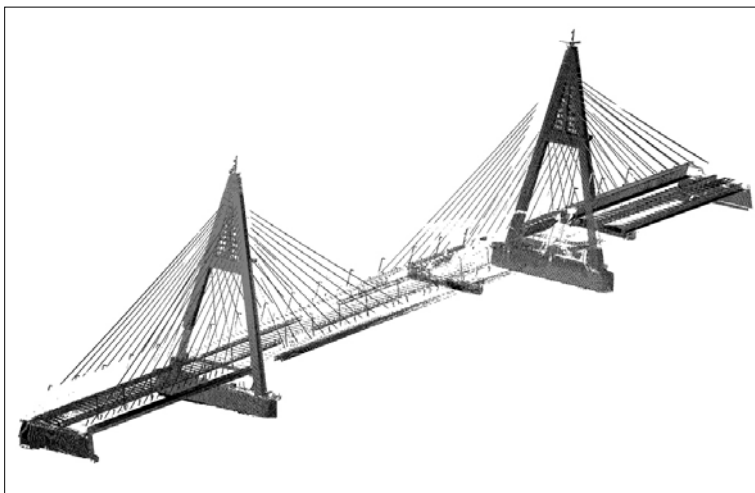
scan	Pest (Riegl Z420i)			Sziget (Riegl Z390i)		
	idő	felbontás	pontszám	idő	felbontás	pontszám
áttekintő mérés	1'30"	0,20°	716 604	1'29"	0,20°	713 216
részletes felmérés	21'41"	0,03°	5 756 028	21'14"	0,03°	6 407 291



2. ábra Eredmény pontfelhő az álláspontok jelölésével

A pontfelhős ábrákon (2–4. ábra) jól látható, hogy a két álláspontból végzett mérések eredményeként előállt pontfelhőn könnyen felismerhetők még olyan viszonylag kisebb méretű szerkezeti elemek is, mint a kábelek vagy kandeláberek. A műszerek elhelyezésénél az említett okok miatt a műszerektől távolodva az egységfelületen értelmezett pontsűrűség csökken, melyet tovább ront a kedvezőtlen (túl hegyes) beesési szögek okozta lézerek pontjel szóródás. Ezen kívül a híd közepe tájékán a hídszékény oldala még felületkezelés előtt állt, az anyag visszaverési képessége pedig alapvetően függ a színétől és felületétől.

A 2. ábrán jól kivehető, hogy a sziget oldali pilon környékén a pályalemez alatt két szerelő-



3. ábra A 2. teherállás (sötét – terheletlen, világos – terhelt állapot)

állvány volt a hídszékényhez erősítve, ezek a viszonylag nagy objektumok kitakarásukkal a híd alsó kereszt-tartóinak azonosítását akadályozták.

Az alábbi ábrákon a sötét pontok a nullmérés eredményei (terheletlen állapot), míg világos színnel a 2. teherállás pontfelhői vannak jelölve (3–4. ábra).

A 3. ábra nézőpontja a pilonok mozgásának elemzését teszi lehetővé; a 2. teherállásban a pilonok part felőli oldalán volt a terhelés, az átnézeti képen jól láthatóan a pilonok is a partok felé mozdultak el

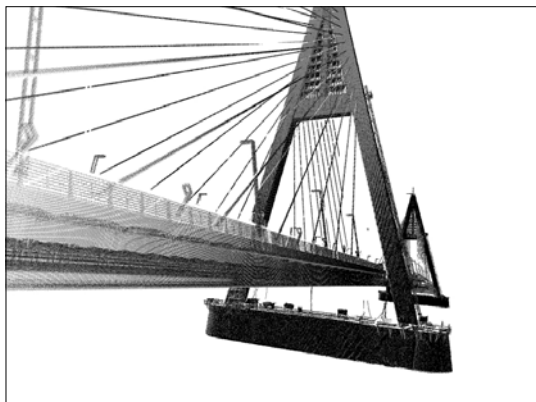
(pilonok belső fele sötét, külső világos).

A 4. ábrán a pályalemez mozgása figyelhető meg, jól láthatóan a 2. teherállás felmérésének pontjai egyértelműen a terheletlen állapot pontfelhője alatt helyezkednek el.

A fentieknek megfelelően, a 3. teherállásban, amikor a hidat a pilonok között terhelték, a pilonok egymás felé dőltek és a pilonoktól part felé eső pályalemez szakaszok felfelé mozdultak el.

A 4. teherállás szintén egy terheletlen állapot, amely a híd maradé alakváltozásainak kimutatását célozza. E teherállás pontfelhői természetesen nagyon közel esnek a nullmérés pontjaihoz, mégis észrevehető, hogy a 3. teherállás után következett, a pilonok még mindig, ha sokkal kisebb mértékben is, egymás felé dőlnek.

A további elemzések során az elsődleges feladat tehát a vizsgált területeken a híd egyes részeinek, elemeinek modellezése. Ez történhet kézi úton (pl. jól kirajzolódó él pontjainak kijelölése, azokra görbe illesztése) vagy automatikusan, hiszen vannak szoftverek, melyek rendelkeznek ilyen opciókkal. Fontos tudni, hogy a szoftverek beépített algoritmusai általában a felhasználó számára ismeretlenek, a tapasztalat alapján sok esetben még az alkalmazott módszer para-



4. ábra 2. teherállás (sötét – terheletlen, világos – terhelt állapot)

méterezésére sincs lehetőség. Ezt a feldolgozás során végig szem előtt kell tartani, adott esetben kézzel (pl. CAD környezetben) ellenőrző mérések válhatnak szükségessé.

A pályalemez elmozdulásainak összehasonlító elemzése

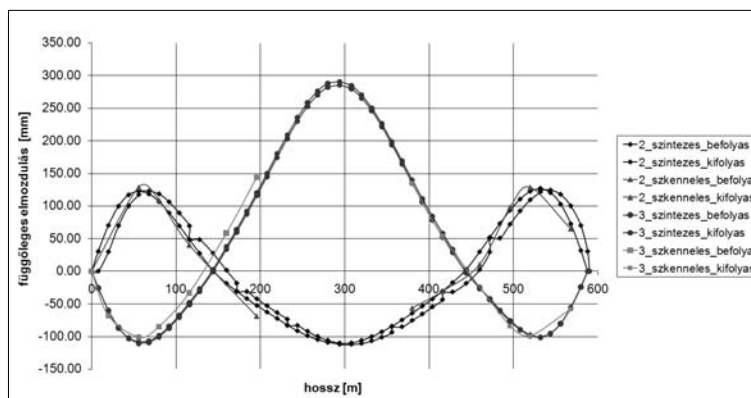
A technológia adta felmérési pontossági elemzések kihasználáshoz azonban nem elegendő a pontfelhőket szemrevételezéssel elemezni, a pontfelhőn méréseket kell végezni. A lézerszkennelés a felmérő és kiértékelő személytől kevésbé függ, mint a hagyományos mérési eljárás. A felmérés során nem előre meghatározott pontokat mérünk, hanem a tér egy szegmensét és benne azokat az objektumokat, melyekről a lézerrugár visszaverődik. Elmozdulás esetén emiatt rendkívül nehéz két állapotban ugyanannak a pontnak az azonosítása. Ezt áthidalandó, a pontfelhőre általában sík vagy térbeli geometriai elemeket (pl. egy kábel esetén egyenes vagy henger) illesztnek és ezen elemek viselkedését vizsgálják. Megjegyezzük, hogy a lézerszkennelésben is van lehetőség előre megjelölt, nagy pontossággal mérhető pontok (ún. reflektorok) alkalmazására. Mivel jelen esetben a pályalemez és a híd egyéb alkotóelemeinek komplex mozgásvizsgálata volt a cél, a reflektorok alkalmazásától eltekintettünk.

Az eredmények értékeléséhez érdemes a pályalemez mozgását mérő felsőrendű szintezés eredményeit referenciaértékeknek tekinteni.

Adott körülmények között a felsőrendű szintezés 1 mm-es középhibájához képest a földi lézerszkenneléses felmérés jellemző középhibája a gyári specifikáció szerint ± 5 mm, melyet a Fotogrammetria és Térinformatika Tanszék független, laboratóriumi mérése korábban igazolt (Maksó 2006). A szintezés eredményeit a lézerrés eredményeivel összehasonlítva megállapítható, hogy azok jól korrelálnak (5. ábra). Az egyes pontokban található eltéréseknek legfőbb okai a már említetteken túl a következők:

- a szintezés során diszkrét pontok elmozdulását mérik, lézerszkennelésnél a pontfelhőre illesztett egyenesek, ívek elmozdulását;
- szintezéssel közvetlenül az útpálya mozgását mérik, lézerszkenneléssel a híd alja látszik, a pályalemez alatti kereszttartókra illesztett íveken keresztül mérjük a pályalemez mozgását;
- a teherállások szintezése alatt a lézerszkennelés a mederhidat az egyik parttól a másik partig 22 perc alatt mérte fel. A híd a terhelés során mozgott, azaz a lézerszkennelt állomány nem pillanatképet adott, hanem „tartalmazta” a híd mérés során szenvedett alakváltozásait is.

A befolyási oldal szintezési és lézerszkennelési eredményeinek összevetéséből (5. ábra) érdekes következtetést lehet levonni. A teherállások mérése során, miután a teherautók elfoglalták helyüket, oldalanként a pályákon egy időben (!) 10–10 állásponton felsőrendű szintezést hajtanak végre, mely körülbelül 25 percig tart. A szintezési jegyzőkönyvekből is kitűnik, hogy a híd eközben még



5. ábra Összesített eredmények

mozog, azaz a mérési intervallum elején és végén nem ugyanaz az alakja! Az eredmények alapján megállapítható, hogy azon az oldalon, ahol a szkennelés kezdődött (befolyási oldal esetén a pesti oldalon), az eredmények jobban korrelálnak a szintezési eredményekkel.

A felmérés közben tapasztalható elmozdulás, a mérési körülmények (éjszakai mérés, sok műszerállás és léceleolvasás) és az elmozdulások (dm-es) nagyságrendje miatt a lézerszkennelés biztosította középhiba alapvető mérnökgeodéziai alapelveket és gyakorlati szempontokat figyelembe véve elegendőnek értékelhető a híd mozgásának felméréséhez.

A híd közepén tapasztalt kisebb pontsűrűség és pontosság miatt e szakasz kiértékelését elvetettük (5. ábra).

A lézerszkennelés terhelésvizsgálatok során való alkalmazásának jelentősége nem a pályalemez vizsgálatában emelkedik ki, hiszen arra a jól bevált szintezés is alkalmazható. A továbbiakban olyan példákat mutatunk, melyeket hagyományos geodéziai módszerekkel nem, vagy csak rendkívül költséges módon lehetne elvégezni.

A pilonmozgás vizsgálata

A lézerszkennelés előnye terhelésvizsgálatok során olyan területeken domborodik ki, melyet hagyományos módszerekkel nem lehet vagy nem érdemes mérni. A terhelésvizsgálat alatt a pilonok mozgását geodéziai módszerekkel diszkrét pontokban mérik, lézerszkenneléssel a teljes felület mozgása leírható, az esetleges deformáció kimutatható.

A 6. ábrán a pesti pilon part felőli oldalára legjobban illeszkedő referencia síkhoz viszonyított eltéréseket ábrázolja, azaz megfigyelhető a pilon keresztmetszetének változása a terheletlen állapotban (bal oldali, nagy kép).

A 2. és 3. teherállásokban jól megfigyelhető a pilon part irányú és azzal ellentétes dőlése (6. ábra, jobb oldali képek).

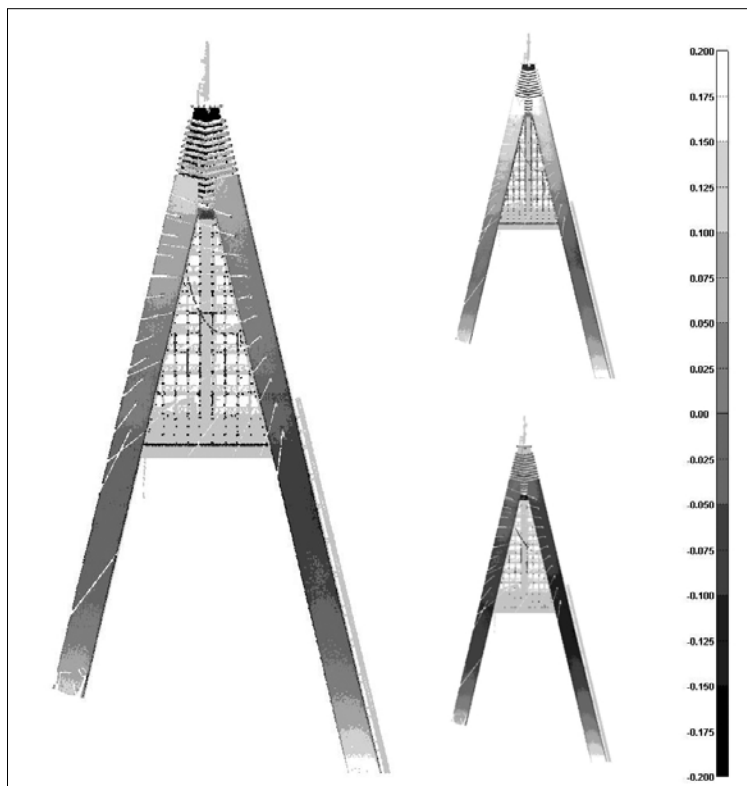
Kábelek mozgásának vizsgálata

A lézerszkennelt pontfelhő pontsűrűsége és felbontása lehetővé teszi a kábelek modellezését és így a kábelmozgások kiértékelését. Ez olyan alkalmazási terület, melyet geodéziai módszerekkel nem mérnek a terhelésvizsgálat során.

A 7. ábrán a pesti pilon befolyási oldali kábelei elmozdulásainak árnyalatos megjelenítése látható a nullmérésben felvett terheletlen állapothoz viszonyítva.

Jól látható, hogy a legnagyobb alakváltozást, illetve a terheletlen állapotban felmért kábelhelyezethez viszonyított legnagyobb elmozdulást a leghosszabb kábelek szenvedték, hiszen ezeknél a pályalemez oldali befogásuknál (a pillér felett) a pálya nem tudta „lekövetni” az elmozdulást, így azt teljes mértékben a kábeleknek kell felvenniük. A pilon különleges, „A” betű formája miatt a kábelek nem egy síkban helyezkednek el, ezért a tónusos reprezentációikban azok térbeli elmozdulásait tüntettük fel.

Az eltérések pontos meghatározásához – akár csak a pályalemez esetén – nem elég a pontfelhőt,



6. ábra Pilon alakja, eltérések a referenciasíkhöz képest [m]

vagy a pontfelhő segítségével előállt modellt vizsgálni, hanem célszerű meghatározott pontokon konkrét elmozdulás értékeket megmérni. Ezt a kábelek függőleges síkra értelmezett vetületén végzett mérésekkel végeztük el.

A kábelek elmozdulásai tetszőleges pontokban mérhetők pl. CAD rendszerben. A nullmérési állapotukhoz képest a kábelek felezőpontjain felvett keresztmetszetekben kiértékeljük az elmozdulásokat; a kábeleket reprezentáló görbék a kábelek pontfelhőire illesztett ívelt hengerek pályalemezhez legközelebb eső élei (8. ábra). Természetesen ezek nem a legnagyobb elmozdulások, azok kiértékeléséhez a kábelek alakját legjobban közelítő függvényeket kell elemezni; a kézi módszerrel végzett mérések szerint a felezőpontokban számolt elmozdulásokhoz viszonyítva nagyságrendi eltérés nem tapasztalható.

Érdekes megfigyelni, hogy pl. a 11-es kábel az egyes teherállásokban -18,9, 40,0 és 22,4 mm elmozdulást mutatott.

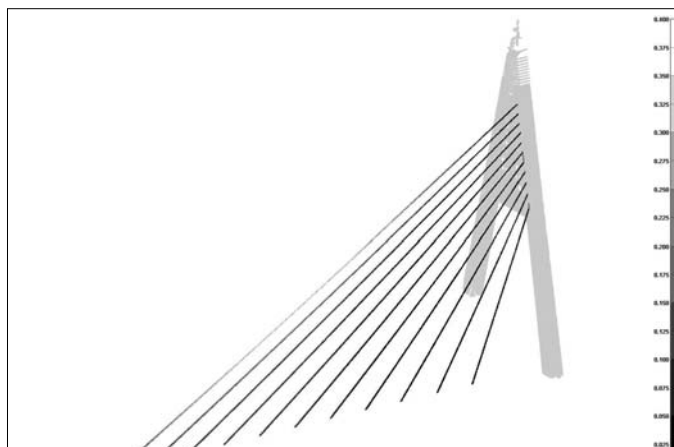
Az egyes kábelek elmozdulásait grafikonon ábrázoltuk (9. ábra). A hosszmerést az első kábeltől indítjuk.

Összefoglalás és javaslatok

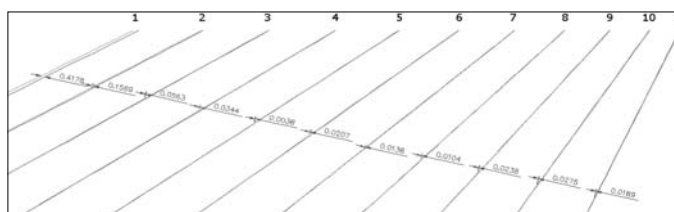
Cikkünkben bemutattuk, hogy a földi lézerszkennelés miként segítheti a hidak terhelésvizsgálati méréseit.

A hagyományos geodéziai módszerekkel való összevetés kimutatta, hogy a lézerszkenneres felmérés eredményei jól korrelálnak a szabatos geodéziai eredményekkel. A lézerszkennelés azonban nem a hagyományos módszerek kiváltásával, hanem azok kiegészítésével támogathatja legjobban a mérnöki szerkezetek mozgás- és deformáció vizsgálatát.

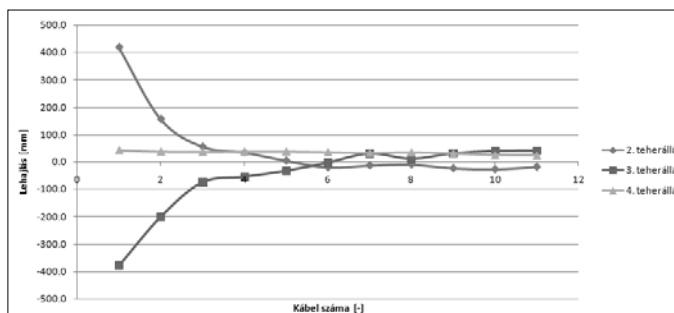
A távérzékelési technológia sajátosságaiból fakadóan a szkennelés a felmérő és kiértékelő személyzettől nagy mértékben független, eredményként nagy pontosságú, térbeli pontfelhő áll elő a felmérendő objektumról. A különböző állapotokban rögzített szerkezet alakján utólag, a



7. ábra Kábelek mozgás a 3. teherállásban [m]



8. ábra A kábelek elmozdulásai a 2. teherállásban [m]



9. ábra Kábelek elmozdulása

feldolgozás során határozhatók meg azok a pontok, ahol pl. a legnagyobb elmozdulás történt. A pilonok szkennelése felőli teljes felülete modellezhető, mozgásuk kimutatható. Az eredményként kapott pontfelhő sűrűsége és pontossága lehetővé teszi olyan, viszonylag kisméretű vagy keresztmetszeti szerkezeti elemek vizsgálatát is, mint a kábelek mozgása.

A technológia nagy előnye az eredmények még laikusok számára is jól érzékelhető, plasztikus és gyorsan kiértékelhető felület szerű, térbeli megjelenítése. Aktív távérzékelési technológiaként a lézerszkennelés éjszaka is végezhető, pontosságát (az optikai, emberi leolvasást követelő műszerek-

kel szemben) a fényviszonyok nem befolyásolják. A mai szkennerek által biztosított felbontás és hatósugar (≈800 m) nehezen elérhető és/vagy nagyméretű szerkezetek felvételét is lehetővé teszi.

Érdeemes a technológia hátrányairól is szót ejteni. Az eleredő eső gátolja, megzavarja a lézersugarak egyenes terjedését és megköveteli a szkennerek és kiegészítő berendezései (laptop, áramellátás stb.) vízvédelmét.

A jelenlegi földi lézerszkennerek pontossága nem éri el a geodéziai műszerek milliméteres vagy milliméter alatti pontosságát, biztonsággal csak ±5 mm-es középhiba érhető el. Sok esetben azonban az elmozdulások (több cm-es vagy dm-es) mértéke esetleg indokolatlanná is teheti az ennél nagyobb pontossági követelményeket.

Az előnyöknél szereplő objektív felmérési módszernek hátránya is lehet, hogy nem előre meghatározott pontokban születnek a mérési eredmények, hiszen sok esetben olyan pontokon kell mérni, melyek a szerkezet szempontjából különös jelentőségűek. A nyers lézerszkennelt pontfelhőben a pontok azonosítása nehézkes, erre a modellezés ad lehetőség (pl. pontok meghatározása egyenesek metszésével), illetve a korábban említett reflektorok alkalmazása segíthet.

A szkennerek csak az álláspontból látható, a szkennerek hatósugarában található objektumokat méri fel. Ebből adódóan még két szkennerek alkalmazásával is rengeteg kitért terület adódik komplex szerkezetek esetében.

A technológia sajátosságából fakadóan biztosítani kell az egységes visszaverődési jellemzőket.

Bár a korábbi vizsgálatokkal szemben Magyarországon elsőként két lézerszkennerekkel párhuzamosan rögzítettük az egyes teherállásokban jelentkező elmozdulásokat, a távolságok és becsési szögek miatt a pályalemez mozgásának vizsgálata során a pesti oldalon csak a befolyási, míg a szigeti oldalon csak a kifolyási oldalon születnek értékelhető eredmények. Hasonló nagyságú szerkezet esetén megfontolandó még több szkennerek bevetése, lehetőség szerint állandó tájékoztató pontok (reflektorok) alkalmazásával akár a pályán elhelyezett szkennerekkel történő mérés is.

Köszönetnyilvánítás

A cikkben bemutatott kutatás a Bolyai János Kutatási ösztöndíj támogatásával készült. A szerzők

köszönetet mondanak a Burken Kft.-nek a felmérés és feldolgozás során nyújtott értékes közreműködésért.

IRODALOM

Lovas, T.–Barsi, Á.–Detrekői, Á.–Dunai, L.–Csák, Z.–Polgár, A.–Berényi, A.–Kibédy, Z.–Szócs, K. (2008): Terrestrial Laserscanning in Deformation Measurements of Structures, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXVII, Part B5, pp. 527–531.

Lovas, T.–Barsi, Á.–Polgár, A.–Kibédy, Z.–Berényi, A.–Detrekői, Á.–Dunai, L. (2008): Potential of Terrestrial Laserscanning Deformation Measurement of Structures, Proc. ASPRS Annual Conference, Portland, USA, April 28 – May 2, p.10.

Lovas, T.–Barsi, Á.–Polgár, A. (2007): A Dunaújvárosi Duna-híd terhelésvizsgálatának támogatása földi lézerszkenneléssel, tanulmány, p. 14

Lovas, T.–Barsi, Á.–Polgár, A.–Kibédy, Z.–Detrekői, Á.–Dunai, L. (2007): A dunaújvárosi Pentele híd terhelésvizsgálatának támogatása földi lézerszkenneléssel, Geodézia és Kartográfia, Budapest, Vol. LIX, No. 10–11, pp. 32–39

Polgár, A. (2007): Hídszerkezet terhelésvizsgálatának támogatása földi lézerszkenneléssel, diplomaterv, p. 45

Maksó, M. (2006): Mérnöki szerkezetek deformációjának meghatározása földi lézerszkenneléssel, diplomaterv, p. 45

www.laservision.hu

Supporting the load test measurement of the Megyeri bridge by terrestrial laserscanning

Lovas, T.–Berényi, A.–Barsi, Á.–Dunai, L

Summary

This paper deals with the investigation of laserscanning in load test measurements of the Megyeri bridge. It discusses the procedure of the simultaneous measurement of two scanners and the processing of the laserscanned point cloud. The (graphical and numerical) evaluation of results is extended by recommendations for further application of laserscanning in the field of deformation and load test measurements.