

AZ M0 AUTÓPÁLYA ÉSZAKI DUNA-HÍD STATIKAI MODELLEZÉSE ÉS IGÉNYBEVÉTEL-SZÁMÍTÁSA

Vigh László Gergely - Hunyadi Mátyás** - Honfi Dániel* - Dunai László****

RÖVID KIVONAT

Jelen cikkben az M0 Autópálya Északi Duna-híd statikai modellezését és igénybevétel-számítását ismertetjük. A különböző céloknak megfelelően különböző részletességű modelleket fejlesztettünk ki, melyekről rövid áttekintést adunk. Részletesen tárgyaljuk a globális igénybevételek számításához alkalmazott modelleket. A cikk végén jellemző igénybevétel-eloszlásokkal illusztráljuk a számítás eredményeit.

I. BEVEZETÉS

Szakértőként feladatunk volt az M0 Autópálya Északi Duna-hídjának (1. ábra) független szilárdsági, stabilitási, aerodinamikai és földrengési ellenőrzése. Jelen cikkben az alkalmazott statikai modellezést és igénybevétel-számítást mutatjuk be.

A ferdekábeles M0 híd két „A” alakú pilonja előfeszített vasbeton keresztmetszettel készül, középső támaszköze 300 m, teljes hossza 600 m. Az acél, két szekrény főtartós, ortotróp pályalemezes merevítőtartó a ferdekábeles



1. ábra: M0 Autópálya Északi Duna-híd

függesztésen kívül a pilonszárakra is feltámaszkodik. Hosszírányban csak az egyik pilonszárnál van rögzítve két saruval. A szerkezetről bővebb leírás található [1, 2]-ben.

A híd statikai számítása során a végleges állapot analízise mellett az egyes építési állapotok ellenőrzése, illetve az építési folyamat nyomon követése is hangsúlyos szerepet kapott. Ez önmagában megköveteli speciális numerikus modellek kifejlesztését. Ezen túlmenően – különösen a merevítőtartó esetében – az egyes szerkezeti részletek fejlett modellezése is szükségessé vált.

Ezek miatt a különböző céloknak megfelelően különböző részletességű végeelemes modelleket fejlesztettünk ki. A globális igénybevételek számításához kétféle rúdmodellt alkalmaztunk, a merevítőtartó szerkezeti részleteinek vizsgálatához pedig felületszerkezeti almodelleket fejlesztettünk ki. Jelen cikkben – az egyes

* okl. építőmérnök, doktorandusz, BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke

** okl. építőmérnök, tudományos segédmunkatárs, Tartószerk. Numerikus Mechanikája Kutatócsoport

*** okl. építőmérnök, Dr. habil, egyetemi tanár, BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke

modellezési szintek rövid áttekintése után – a globális analízisben alkalmazott rúdmodellekkel foglalkozunk részletesebben, külön hangsúlyozva a számítás és a végelemes modell sajátosságait.

A modellépítés – analízis – eredmény-feldolgozás folyamatát általunk kifejlesztett Matlab-algoritmus vezérelte, illetve hajtotta végre. Az eljárást a modellismertetés keretein belül illusztráljuk.

Az egyes modellek ellenőrzését, egymáshoz való összehasonlítását szintén bemutatjuk. A modellek gyakorlati alkalmazásának illusztrálására jellemző igénybevétel-eloszlásokat mutatunk be a cikk végén.

2. A NUMERIKUS MODELL

2.1. Modellezési szintek áttekintése

A független statikai vizsgálat során a szerkezeti analízist – igazodva a méretezési eljárások követelményeihez – különböző szintű modelleken hajtottuk végre:

- *Rúd#1 globális modell*: a pilonok, kábelek és a merevítőtartó egyaránt rúdelemekkel definiálva;
- *Rúd#2 globális modell*: szintén térbeli rúdmodell, de a merevítőtartó tartórácsként modellezve;
- *Rúd – felület globális modell*: alapja a Rúd#2 modell, de a merevítőtartó a pontosabb felületszerkezeti modellel reprezentálva;
- *Felületszerkezeti almodellek*: egyes szerkezeti részletek felületmodellként.

Az első és második modell (*Rúd#1* és *Rúd#2*) segítségével végeztük el a globális statikai analízist, azaz a fő igénybevételek számítását. A modellek a végállapot analízise mellett alkalmasak az építési folyamat nyomon követésére is. A cikk további részében ezen modelleket tárgyaljuk részletesen.

A *Rúd – felület* modell egyrészt a rúdmodellek ellenőrzésére szolgál, másrészt a *Felületszerkezeti almodellek* kiindulópontját jelenti, amelyekkel aztán az egyes szerkezeti csomópontok részletes vizsgálatát lehet végrehajtani. Ezen modellezési szintek ismertetésére külön cikkben kerül sor [3].

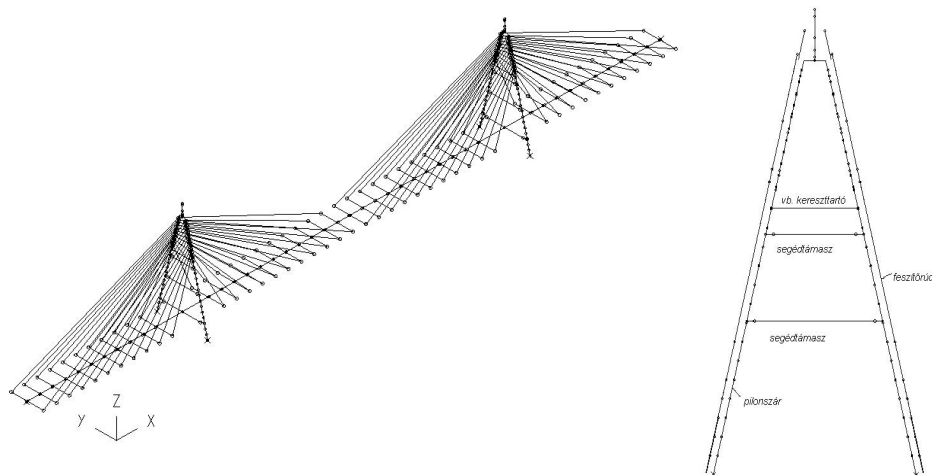
2.2. Rúd#1 modell

Az 1. modellszint térbeli rúdszerkezetként modellezi a feszített pilonokat, a ferdekábeleket és a merevítőtartót (2. ábra). A modellt az ST1 [4] rúdszerkezeti hidas célprogram alkalmazásával dolgoztuk ki. A program alkalmas az építési sorrend figyelembevételére (elemek aktiválása, anyagjellemzők, feszítőerők időbeli változása, stb.). A pilont alkotó 2 csomópontos, 6 csomóponti szabadságfokú rudak elemei idomulnak az építési egységekhez. A keresztmetszeti és globális geometria alapján a szoftver automatikus generálja a pilonszár külpontos feszítését modellező rúdelemeket. A program a feszítés mindenkori állapotával számol, figyelembe veszi a feszítési veszteségek időbeli lezajlását. A merevítőtartót annak teljes keresztmetszetét magába

foglaló rúdelemekkel vettük figyelembe, amelyek a kábelbekötési pontokhoz merev elemek segítségével kapcsolódnak. Ily módon a modellben a merevítőtartó keresztmetszete csavarásra alaktartóként viselkedik. A ferdekábeleket rácsrúdelemekkel modelleztük. A modell megközelítőleg 250 csomópontból áll.

Az időtől függő folyamatok (beton lassú alakváltozása, feszítőerő relaxációja, feszítési veszteségek, stb.) tekintetében a program alapvetően a francia BPEL 91 szabványnak [5] megfelelően végzi a számítást, melyet bizonyos paraméterek alkalmas megválasztásával a magyar szabvány vonatkozó előírásaihoz tudunk kalibrálni.

Ezt a modellt elsősorban a pilon statikai vizsgálatához, másodsorban a *Rúd#2* modell ellenőrzéséhez használtuk. A modellt részletesen bemutatjuk [1, 2]-ben.



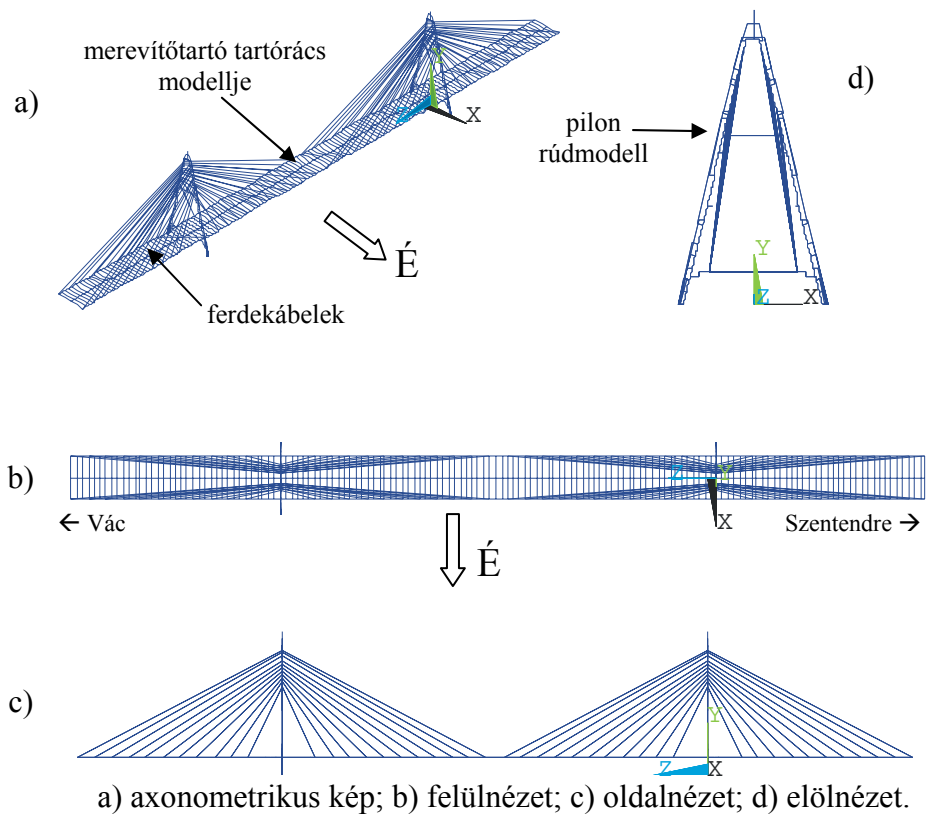
2. ábra: *Rúd#1* globális térbeli rúdmodell

2.3. Rúd#2 modell

A 3. ábrán látható a második modellezési szinten alkalmazott *Rúd#2* modell. Ezen a szinten, ellentétben az előző szint célorientált szoftverével, egy általános végeleemes rendszert, az Ansys-t alkalmaztuk [6].

A szerkezet modellje térbeli rúdmodell. Az alkalmazott elemtípusokat az 1. táblázat foglalja össze. A pilon 3 csomópontos, 7 csomóponti szabadságfokú rúdelemekből áll, amelyekhez mereven kapcsolódnak a feszítőrudakat reprezentáló, külpontosan elhelyezett, csak húzásnak ellenálló rúdelemek. A ferdekábeleket szintén ilyen kábelelemekkel modelleztük. Így a pilon és a ferdekábelek modellje alapvetően megegyezik az előző szintével.

Egyik fő különbség a merevítőtartó modellezésében rejlik: itt azt tartórácsként vettük figyelembe (4. ábra). A hídtengely irányú szélső elemek tartalmazzák a szekrény főtartót és egy együttdolgozó pályalemezsávot, míg a középső a hossztartót és együttdolgozó lemezt. Hasonlóan, a keresztirányú elemek egy-egy kereszttartót és együttdolgozó pályalemezt modelleznek. Ilyen módon a modellbe bevitt merevségek jól közelítik a valóságot. Ezt a később ismertetésre kerülő vegyes, rúd – felület modellel történő összehasonlítás is alátámasztja.



3. ábra: Rúd#2 globális térbeli rúdmodell

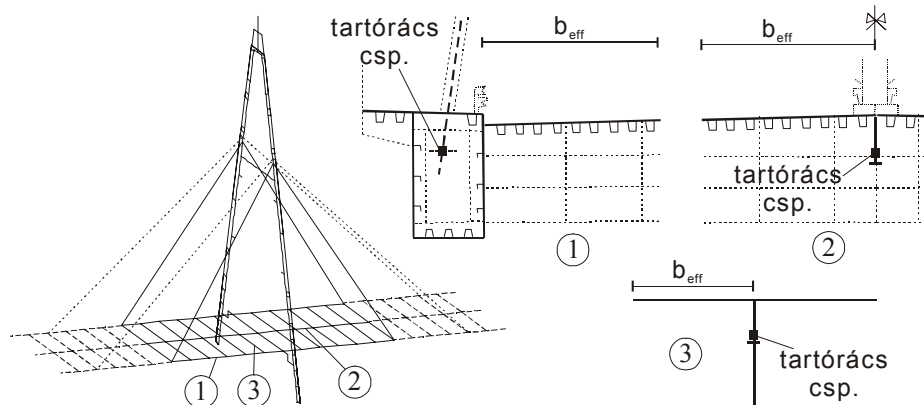
1. táblázat: Rúd#2 modell – alkalmazott elemtípusok [6]

Szerkezeti elem	#	ANSYS jel	Elemtípus	csp. & DOF
pilonszár beton elemei	1	BEAM189	gerendaelem	3
				6(7)
feszítőrúdak	2	LINK10	kábelelem	2
				1
pilon keresztartó	1	BEAM189	gerendaelem	3
				6(7)
pilon kiskonzol	4	BEAM4	gerendaelem	2
				6
pilon segéd támasz	3	BEAM4	gerendaelem	2
				6
merevítőtartó	6	BEAM189	gerendaelem	3
				6(7)
ferdekábel	7	LINK10	kábelelem	2
				1

Másik különbség az előző szinthez képest, hogy – mivel általános végeselemes szoftverrel dolgoztunk – lehetőség nyílt minden tekintetben – így pl. a kúszás esetében is – a magyar szabvány előírásait követni. Megjegyezzük, hogy széleskörű vizsgálatok keretében ellenőriztük a modellezési részletek pontosságát, illetve kalibráltuk a kifejlesztett speciális modellezési technikákat, amit a szoftver általánossága tett szükségessé.

A teljes híd modellje 1423 elemből és 3408 csomópontból áll.

A modell részletes leírása megtalálható [1], [2] és [7]-ben.



4. ábra: A merevítőtartót modellező tartórács

2.4. A numerikus vizsgálatok módjai

2.4.1. *Az építési folyamat szimulációja* A statikai vizsgálatok során az időben lezajló folyamatok miatt az építési folyamat hatásának figyelembevétele a feszített vasbeton pilon vizsgálatokor, illetve a ferdekábelek tekintetében elengedhetetlen volt.

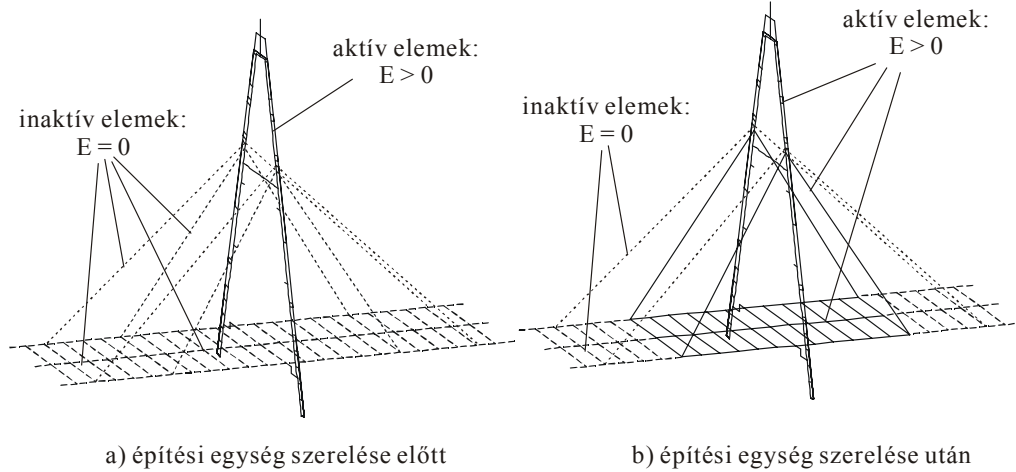
A *Rúd#1* modell, illetve a szoftver alkalmas az építési ütemterv nyomon követésére, a megfelelő elemek aktiválásával (az éppen inaktív elemek nem szerepelnek a merevségi mátrixban). Ez alapján a teljes építési folyamat modellezhető az anyagjellemzők, lassú alakváltozás, elmozdulások, stb. figyelembevételével.

A *Rúd#2* modell esetében speciális technikát dolgoztunk ki az építési folyamat szimulációjára [1]. Az alkalmazott elemtípus lehetőséget ad előre beprogramozott kúszási függvény pontos figyelembevételére. A beton keresztmetszetek zsugorodását és a feszítőerőket, illetve időbeli változásukat időben változó alakváltozás-teherként vettük figyelembe. Az építési ütemterv modellezése az ún. Birth&Death technika speciális változatának segítségével történt. Ennek keretében először a teljes szerkezet modelljét felépítjük. A szimuláció során az egyes építési fázisokban az éppen megépülő elemeket aktiváljuk. Az Ansys rendelkezik egy beépített rutinnal, mely a merevségi mátrixnak az inaktív elemekhez tartozó sorait/oszlopait egy alkalmasan megválasztott tényezővel szorozva „törli”. Azonban bizonyos – [1]-ben részletezett – szimulációs problémák miatt esetünkben ezt a beépített rutint nem tudtuk alkalmazni. Számításunk egyik specialitása egy új eljárás kidolgozásában rejlik. Az eljárás lényege, hogy az egyes építési fázisokban inaktív elemekhez zérus rugalmassági modulust rendelünk, míg az aktív elemekhez azok tényleges anyagjellemzőit. Ezt szemlélteti az 5. ábra. A szimulációs technikát a *Rúd#1* modell eredményei alapján ellenőriztük. Az alkalmazásra és az eredményekre mutat példát a 6. ábra egy pilonszár-egység feszítésének, majd a pilon-keresztgerenda megépítésének folyamatán keresztül.

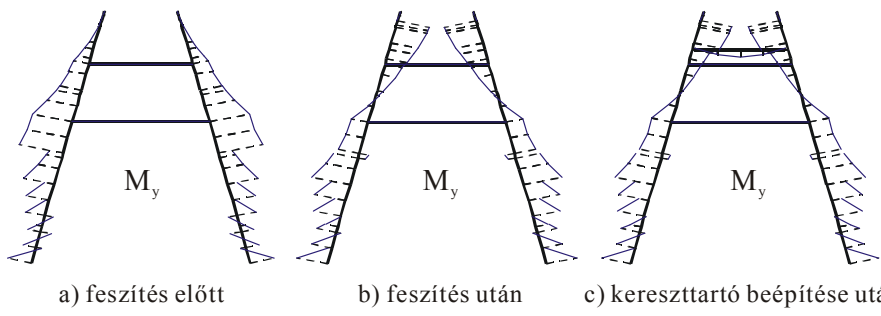
A *Rúd#2*-höz kidolgozott eljárás meglehetősen bonyolulttá és időigényessé tette az analízist, ezért az építés szimulációjára a továbbiakban a *Rúd#1* modellt alkalmaztuk.

2.4.2. *Statikai vizsgálatok* A végleges és az építési állapotok statikai vizsgálatát jellemzően nagy elmozdulások figyelembevételével hajtjuk végre. A *Rúd#1* modell esetében az építési folyamat szimulációja adja az egyes állapotok statikai vizsgálatát,

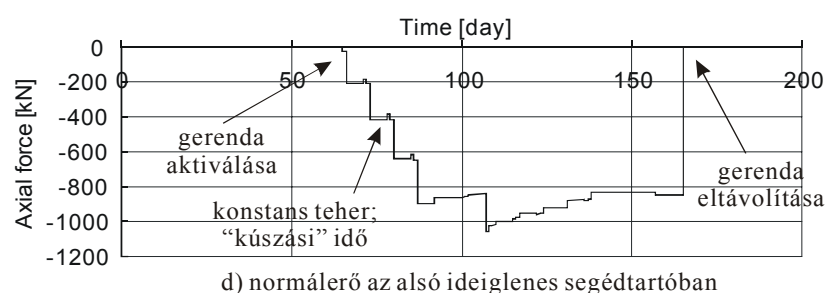
míg a *Rúd#2* modell esetében egyedi kiragadott analíziseket hajtottunk végre. Az időbeli folyamatokat (pl. kúszás) reprezentáló helyettesítő anyagjellemzőkkel számoltunk (pl. beton helyettesítő rugalmassági modulusa). Ezt az egyszerűsítést a modell összetettsége és nagysága indokolta. A modellt, illetve az alkalmazandó jellemzőket a *Rúd#1* modell eredményeivel való összevetés alapján kalibráltuk.



a) építési egység szerelése előtt b) építési egység szerelése után
5. ábra: Speciális Birth&Death technika elve



a) fesztítés előtt b) fesztítés után c) kereszttartó beépítése után



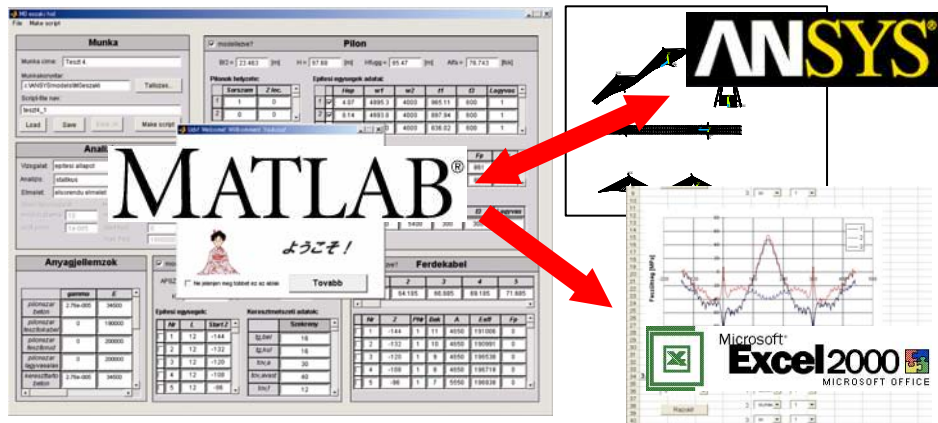
d) normálerő az alsó ideiglenes segéd tartóban

6. ábra: Építési folyamat szimulációja a *Rúd#2* modellel

2.4.3. *Stabilitási, aerodinamikai és földrengésvizsgálat* A *Rúd#2* modellt alkalmaztuk a szerkezet rugalmas globális stabilitási, illetve az aerodinamikai és földrengésvizsgálatokhoz is [8, 9]. A vizsgálat az előfeszített, terhelt szerkezet kritikus teherparamétereinek, sajátfrekvenciáinak és rezgésalakjainak elsőrendű számítás keretében történő meghatározásával indul. Az eredmények vagy közvetlenül beépíthetők a további szabványos ellenőrzésbe vagy további numerikus vizsgálatok alapját képezik (pl. spektrumanalízis földrengésvizsgálat esetén).

2.5. A modellépítés és analízis folyamatvezérlése

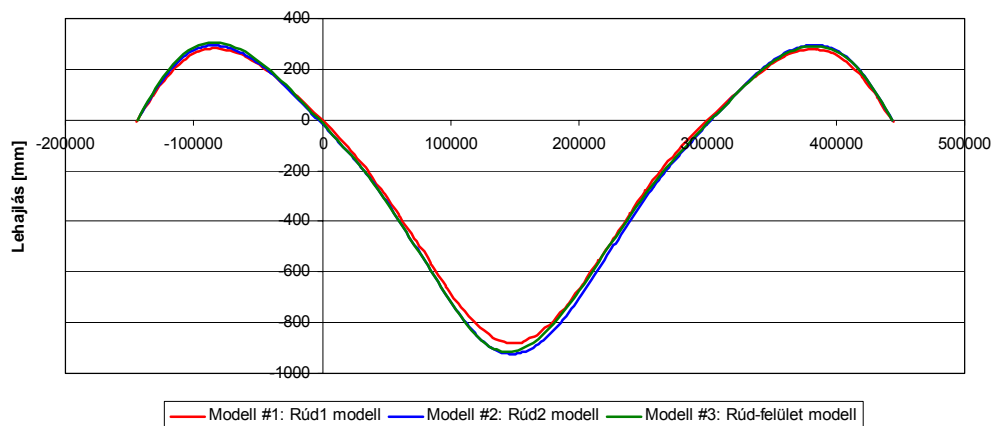
A vizsgálatok során igen nagyszámú esetet kellett feldolgoznunk. A hatékonyság növelése érdekében a modellépítés – analízis – eredmény-feldolgozás – dokumentálás folyamatát automatizáltuk egy, az e célra általunk kifejlesztett Matlab-algoritmus segítségével (7. ábra). Az algoritmus felhasználóbarát környezetben bevitt bemenő adatokból egy, az Ansys-t vezérlő input-file-t állít elő, amely a modellépítéstől (*Rúd#2* és *Rúd – felület* modellek) az analízisen át az eredmények kigyűjtéséig közbeavatkozás nélkül irányít mindent. A kigyűjtött eredményeket a Matlab-rutin feldolgozza és közvetlenül nyomtatható formában Excel dokumentációt állít elő.



7. ábra: Modellépítés – analízis – eredmény-feldolgozás – dokumentálás folyamatvezérlése

2.6. A modellek verifikációja

A pilon építési folyamatának szimulációját részletes vizsgálat keretében hasonlítottuk össze az ST1 programmal készült *Rúd#1* és az általunk kidolgozott, Ansys-ban működő *Rúd#2* modelleken. A két különféle numerikus modellel kapott eredmények jó egyezést mutattak [1].



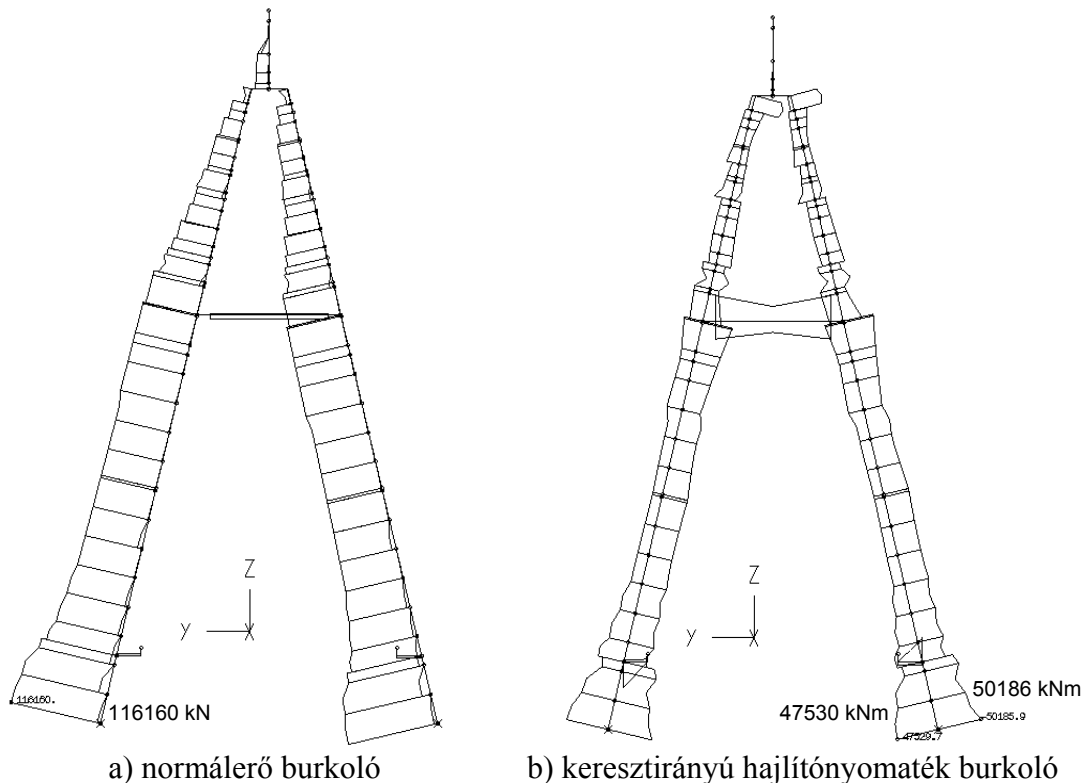
8. ábra: Globális modellek összehasonlítása függőleges terhekre (önsúly + parciális járműteher a középső támaszközben + nagyjármű)

A két globális rúdmodell merevítőtartó-modelljeit a *Rúd – felület* modellel ellenőriztük jellemző terhek esetén. Teljes szélességben megoszló függőleges terhek esetén a három modell egyező eredményeket szolgáltat. Erre mutat példát a 8. ábra. Ugyanakkor csavarást okozó terhek esetén bizonyos szerkezeti elemek vizsgálatában nem elhanyagolható különbségek adódnak, amely a nem-alaktartó keresztmetszeti viselkedés következménye. Megállapítható azonban, hogy a *Rúd#2* tartórács modell jól közelíti a relatíve pontosnak tekintett rúd-felület modell eredményeit.

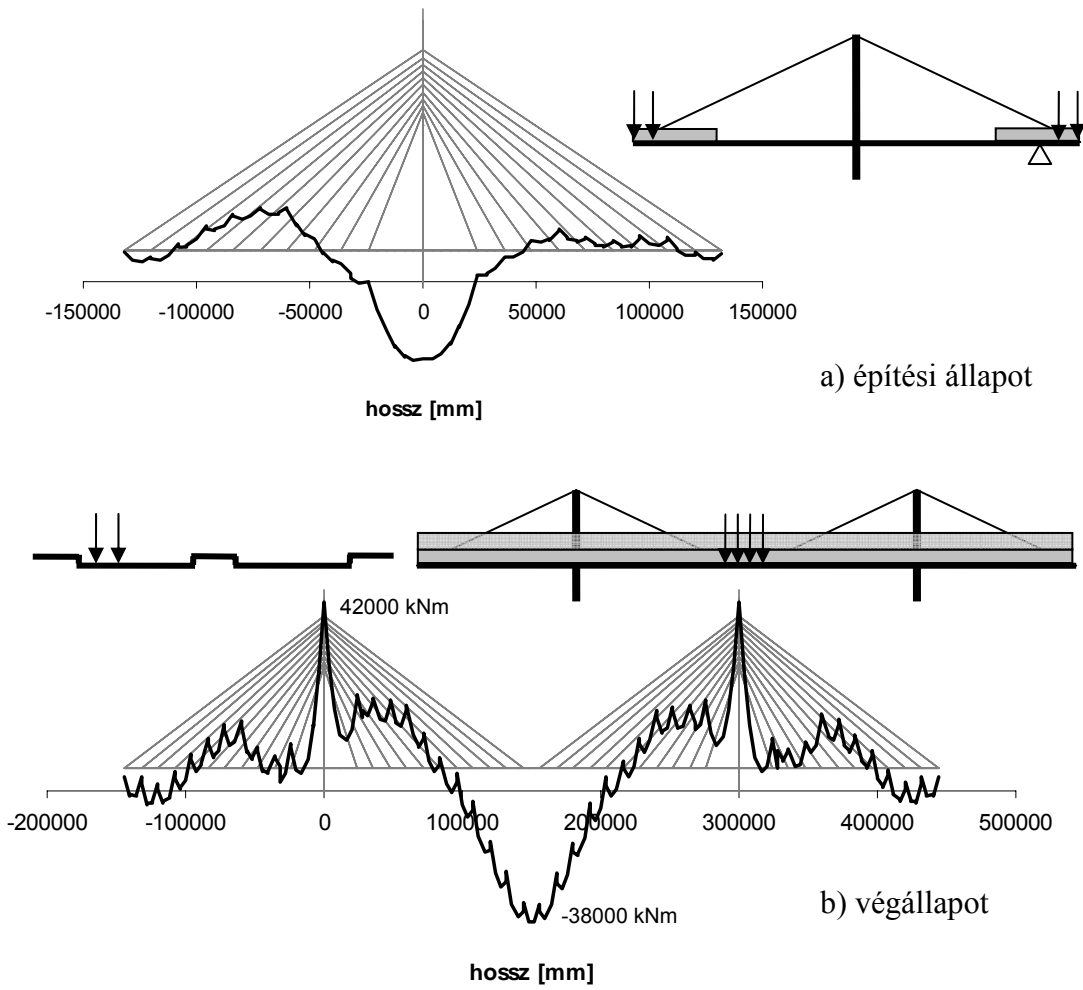
3. MÉRTÉKADÓ IGÉNYBEVÉTELEK SZÁMÍTÁSA

A pilonok ellenőrzését a *Rúd#1* modell eredményei alapján hajtottuk végre. Illusztráció gyanánt, a 9. ábrán a pilonszárakban ébredő normálerő és keresztirányú hajlítónyomaték burkolóábráit mutatjuk be. A szilárdsági ellenőrzést jellemző keresztmetszetekben végeztük el teherbírási felületek alapján [2, 7].

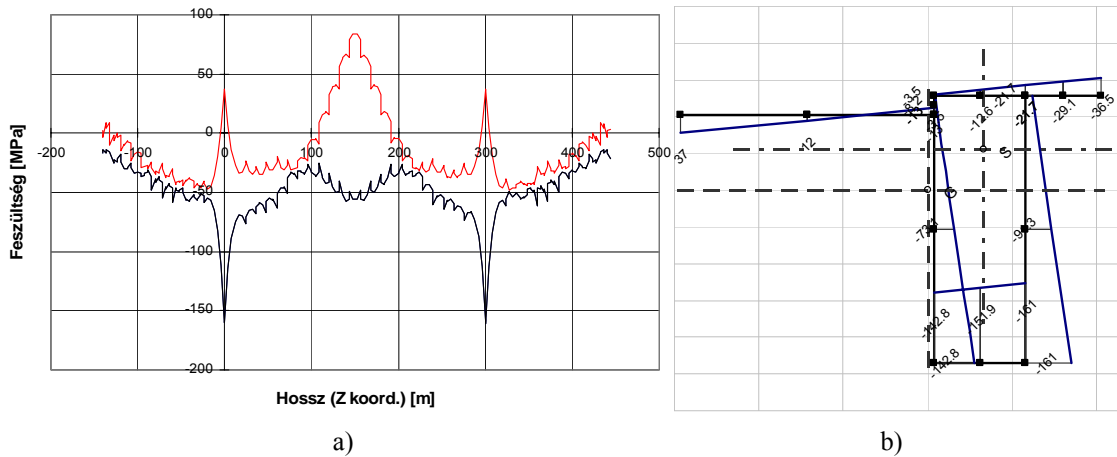
A merevítőtartó szilárdsági ellenőrzését feszültség szinten hajtottuk végre a *Rúd#2* modellen számított igénybevételek alapján [5, 7]. Jellemző hajlítónyomatéki eloszlásokat láthatunk a 10. ábrán egy építési, illetve a végállapotban egy-egy teherkombináció esetén. Az utóbbi esetre mutatja a szekrénytartó maximális hosszirányú feszültségeit a 11/a. ábra, míg a legjobban igénybevett keresztmetszet feszültségeloszlását a 11/b. ábrán láthatjuk.



9. ábra: Pilon mértékadó igénybevételei



10. ábra: Merevítőtartó mértékadó teherkombinációi és igénybevétel-eloszlásai



- a) szekrénytartó hosszirányú $\sigma_{x,min}$ és $\sigma_{x,max}$ feszültségei a híd hossza mentén;
 b) legjobban igénybevett szekrénytartó-keresztmetszet σ_x feszültségeloszlása

11. ábra: Merevítőtartó feszültség számítása
 (önsúly + totális parciális teher + járműteher)

4. ÖSSZEFOGLALÓ MEGÁLLAPÍTÁSOK

Az M0 Autópálya Északi Duna-híd statikai számításához, a globális igénybevételek meghatározásához két végeselemes térbeli rúdmodellt fejlesztettünk ki.

Kidolgoztuk az építési folyamat szimulációs modelljeit. Ennek eredményei alapján kalibráltuk a kiragadott építési fázisokhoz tartozó modelleket. Az így kifejlesztett modellek eredményei jó egyezést mutatnak a szimulációs modellekével.

A merevítőtartót különbözőképpen modellező *Rúd#1* és *Rúd#2* modelleket összehasonlítottuk. Megállapítottuk, hogy csavarást nem okozó terhek esetén a két modell azonos eredményre vezet. Ugyanakkor a merevítőtartó csavarását okozó terhek esetén a keresztmetszet torzulása nem hanyagolható el. Ekkor legalább tartórács-szintű modellezés szükséges.

Az elvégzett számítások eredményei a szabványos ellenőrzések alapját adták. A szabványos számítás szerint a szerkezet szilárdságilag megfelel.

HIVATKOZÁSOK

- [1] M0 Autópálya Északi Duna-híd; Ferdekábeles mederhíd – független statikai vizsgálat, 1. Részjelentés, *BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke*, 2003. november.
- [2] M0 Autópálya Északi Duna-híd; Ferdekábeles mederhíd – független statikai vizsgálat, Jelentés, *BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke*, 2004. április.
- [3] Jakab G. - Joó A. L. - Dunai L.: Az M0 Autópálya Északi Duna-híd merevítőtartójának lokális feszültség számítása, *BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke Tudományos Közleményei*, Műegyetemi Kiadó, Budapest, (2005).
- [4] Programme ST.1 – Calculs de Structures – Notice Utilisateur, *SETRA*, Franciaország, (1992).
- [5] Béton Précontraint aux États Limites 91, Franciaország, (1991).
- [6] ANSYS Structural Analysis Guide, online dokumentáció, *ANSYS Inc.*, (2001).
- [7] M0 Autópálya Északi Duna-híd. Kiegészítő független statikai vizsgálatok, Jelentés, *BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke*, 2004. november.
- [8] Vigh L. G. - Dunai L. - Kollár L.: Szerkezetek modellezése földrengésre – Duna-hidak ellenőrzésének tapasztalatai, *Magyarország Földrengésbiztonsága Konferencia*, pp 241-259, Győr, 2004. november 4-5.
- [9] Vigh L. G. - Kollár L. - Dunai L.: Duna-hidak földrengésvizsgálata, *BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke Tudományos Közleményei*, Műegyetemi Kiadó, Budapest, (2005).