

Alumínium távvezetékben ébredő maradó feszültségek szimulációja

Baksa A.¹, Kiss L. P.², Sepsi M.³, Barkóczy P.⁴, Mertinger V.⁵

¹ Miskolci Egyetem, Műszaki Mechanikai Intézet, mechab@uni-miskolc.hu

² Miskolci Egyetem, Műszaki Mechanikai Intézet, mechkiss@uni-miskolc.hu

³ Miskolci Egyetem, Fémtani Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet, femsepsi@uni-miskolc.hu

⁴ Miskolci Egyetem, Fémtani Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet, fembarki@uni-miskolc.hu

⁵ Miskolci Egyetem, Fémtani Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet, valeria.mertinger@uni-miskolc.hu

Absztrakt

A maradó feszültség állapot tervezése és kontrolálása a fémek esetében az ipar számos területén ma már elengedhetetlen elvárás. A távvezeték esetében a kedvezőtlen maradó feszültségi állapot a sodrony szerkezeti egységét veszélyezteti annak üzemeltetése során, valamint ennek következményeként a szétugró sodrat vég lehetetlenné teheti a vezeték telepítését. A kutatás célja egy vizsgálati eljárás kidolgozása, amellyel a sodrony feszültségállapota jellemezhető és az esetleges szerelési probléma előre jelezhető. Ezért szükséges a késztermék mechanikai állapotának feltérképezése a maradó feszültségek és alakváltozások részletes megismerése érdekében. Ennek vizsgálatára a termékszabványok nem adnak egyértelmű módszert és elfogadási kritériumot. A szerkezet komplex jellege nem teszi lehetővé egyszerű vizsgálati eljárás alkalmazását, de a modern szimulációs módszerek lehetőségei megoldást jelentenek. A fejlesztés jelenlegi szakasza rámutatott arra, hogy digitális ikermodell alkalmazásával a huzalok elmozdulása alapján következtetni tudunk a huzalok feszültségállapotára, amiből az adott maradó feszültség számítható. Jelen cikk keretein belül egy alumíniumból készült $37 \times 2,89$ mm szerkezetű sodronykötél gyártásának vége-selemes modellezését ismertetjük. A valós viszonyok minél pontosabb közelítése érdekében a feladat megoldása során figyelembe vettük a nemlineáris viselkedést – anyagi és geometriai oldalról, valamint a huzalok egymással való érintkezéseiből adódóan is.

1 Bevezetés

A mérnöki gyakorlatban igen kedvelt az alumínium távvezeték használata. Ezek jellemzően egy maghuzalból és számos további, egymással érintkező spirálisan elhelyezkedő szálból épülnek fel. Elterjedtségük okai kiváló teherbírásuknak, valamint a különféle igénybevételekkel (húzással, hajlítással, vagy csavarással) szemben való kedvező mechanikai viselkedésüknek köszönhető. A hidegen húzott ötvöztelen alumínium huzalokból gyártott távvezetékeket többnyire alállomási kötésekben alkalmazzák, azonban az ötvözött alumínium (0,5% Mg) huzalokból készült elosztóhálózatokban önállóan is felhasználgják [1].

A mindennapi életben gyakran lehet velük találkozni felvonókötélként, távvezeték-ként, vagy éppen hídszerkezeteknél is. Mint számos szerkezeti elemnél, a távvezeték sodronyoknál is meghatározó lehet a gyártást követően fennálló maradó feszültség állapot. Egy járműipari gépalkatrésszel szemben viszont nem csak az igénybevétel során kialakuló feszültség szuperpozíciós állapot okozhat problémát, hanem szélsőséges esetben már a sodrony szerelését is lehetetlenné teszi. Sok esetben már az is gondot okozhat, hogy a sodrony integritása felbomlik. Erre mutat példát az 1. ábra.



1. ábra: A sodratszerkezet valóságos szálkiosztása és a látható menetirányok

A maradó feszültségállapot röntgendiffrakciós eljárással általában jól mérhető. Viszont a sodronyok esetében nem volt értelmezhető különbség a sodronyszálak felületen mért adatok között a jól és a rosszul szerelhető vezetékek esetében, ezért a probléma megoldására egy másik megközelítést alkalmaztunk. Az ötlet az volt, hogy a sodratban tárolt rugalmas feszültséget a huzalok elmozdulásával is lehetne jellemezni, amennyiben a kvantitatív leírása az elmozdulásnak megoldott lenne a teljes szerkezetre. Ezért a sodratok darabjairól komputer tomográfiával 3 dimenziós szerkezet leírást végeztünk, majd a sodratokat felszabadítottuk és újra elvégeztük a szkennelést. A következő lépés, hogy az elmozdulásokból feszültséget kell számolni, amihez digitális ikermodell kidolgozására volt szükség. A digitális ikermodell a sodrást szimulálva igyekszik a huzalokban ébredő feszültséget meghatározni.

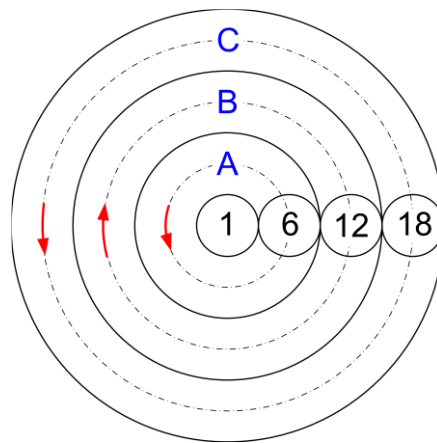
Mivel a sodronykötelek régóta életünk részét képezik, a vonatkozó szakirodalom is igen sokrétű és szerteágazó. Léteznek egyszerűsített analitikus, numerikus modellek, de a kísérleti munkák száma is jelentős. Az irodalomban tehát számos forrás foglalkozik sodronykötelek különféle elméleti jellegű mechanikai vizsgálataival. Ezek egy nagyobb csoportja a végeelem-módszert (VEM) alkalmazza a probléma leírására és megoldására. A [2] cikk például a sodrat különféle kifáradási tönkremenetelének számítógépes modellezésével foglalkozik, ideértve a nagyszámú húzási, valamint hajlítási ciklusok hatását is a kiválasztott egyrétegű (1 + 6) szerkezetnél. A szerzők kitérnek különböző paraméterek (kötélhossz, sodrathossz, erő nagysága) hatására is. Ehhez hasonlóan, axiálisan terhelt $6 \times 19 + \text{IWS}$ (*Independent Wire Stand*) kötélfeszültségi állapotát és kifáradással szembeni vizsgálatát mutatja be a [3] munka, háromdimenziós elemek segítségével. Az egymással érintkező szálak kopásának leírásához az Archard feltevés kerül felhasználásra. A [4] tanulmány különböző érintkezési modelleket hasonlít össze. A felhasznált végeelem-modell nagymértékű elmozdulások és alakváltozások elméletén alapul. A szerzők háromféle kötélszerkezetet (hagyományos, Seale és Warrington) és háromféle igénybevételt (húzás, hajlítás és csavarás) vizsgáltak, numerikus eredményeiket pedig kísérletekkel hasonlították össze. Az előző munkákhoz képest egyszerűsített, rúdmodellt alkalmazó kvázi-statisztikus végeelemes szimulációkat ismertet a [5] forrás azzal a céllal, hogy meghatározza a maradó alakváltozásokat, keresztmetszeti szögelfordulásokat és a hajlítási merevséget. A kutatómunka a sodrási folyamatot is modellezi. Az eredmények alapján húzó igénybevétel esetén radiális irányban kifelé haladva egyre csökkennek a feszültségek a kötélfázisokban. Egy saját, p -verziós végeelem-modellt mutattak be a szerzők az [6,7] munkákban kétrétegű sodratszerkezetre, melynek terhelése lehet húzás, hajlítás vagy csavarás. A levezetett rúdmodell nem veszi figyelembe a nyírési energiát, ugyanakkor a szálak relatív elmozdulásából származó kopást magában foglalja.

A jelen kutatómunka tárgya egy háromrétegű, összesen 37 alumínium szálból álló sodronykötél gyártási folyamatának egyszerűsített modellezése azzal a céllal, hogy a feszültségek és elmozdulások kapcsolatát feltárjuk.

A vizsgálatok lehetőséget biztosítanak a gyártási folyamat során ébredő, maradó feszültségek feltérképezésére, melyek ismerete közvetlenül hozzájárulhat a késztermék minőségének javításához.

2 A szimuláció előkészítése, numerikus eredmények

A vizsgálatok tárgyát képező egyszer sodrott, keresztosdrású kötél szerkezet háromrétegű, $37 \times 2,89$ mm szerkezetű – lásd a 2. ábrát. Az *A* jelű belső és *C* jelű külső rétegek bal menetemelkedésűek, míg a középső *B* jelű pedig jobb menetű. Az egyes sodrathosszak (menetemelkedések) belülről kifelé haladva 122, 155 illetve 216 mm értékűek. A szálak (az egyenes maghuzalt is beleértve) 2,89 mm névleges átmérőjűek.



2. ábra: A sodratszerkezet szálkiosztása és menetirányok a modellben

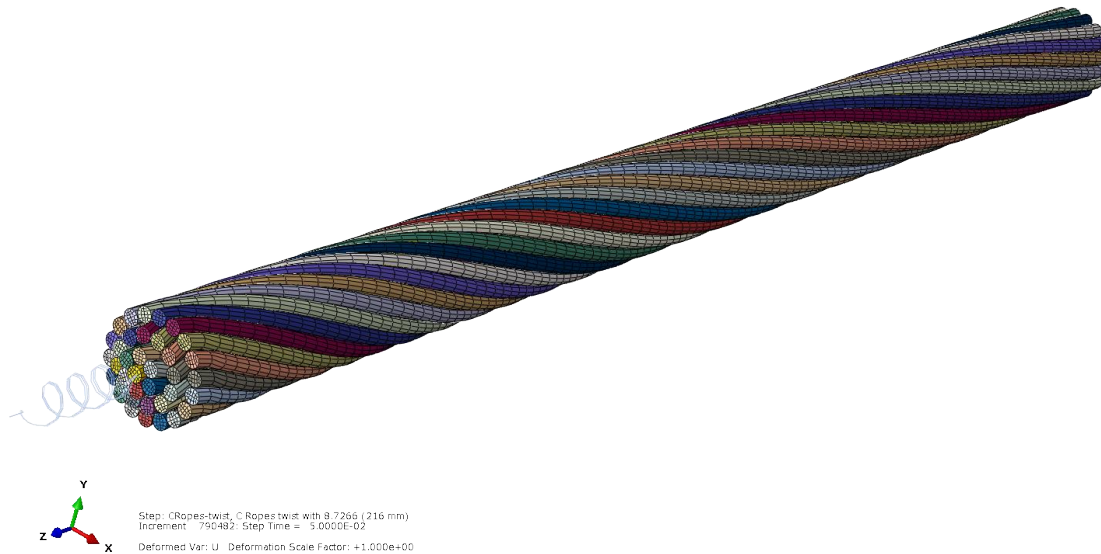
A szerkezet anyaga alumínium, melynek viselkedését bilineáris (lineárisan rugalmas, lineárisan keményedő) karakterisztikával modelleztük.

A rugalmassági modulus $E = 68\,900$ MPa, a Poisson tényező $\nu = 0,33$, a folyáshatár értéke pedig $\sigma_F = 276$ MPa. A maradó nyúlás $\varepsilon_M = 0,22$ nagyságú, a $\sigma_M = 310$ MPa értékű feszültségnél. Az anyag sűrűsége $\rho = 2700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$.

A huzalok kezdetben egyenes középvonalúak, kiinduló hosszuk egyaránt 300 – 300 mm, ami azért célszerű választás, mert kényelmesen belefér egy teljes sodrathossz a *C* rétegnél is. A gyártási folyamat során létrejövő nagymértékű alakváltozások miatt a végeselem-modell geometriailag nemlineáris. A feladat mérete, jellege és jellemzői miatt a szimuláció kivitelezéséhez megfelelő választás az Abaqus kereskedelmi szoftver. Az alkalmazott elemtípus **C3D8R**, ami egy háromdimenziós, nyolc csomópontú lineáris hexaéder elemet jelent, redukált integrálással. A szimulációkhoz biztosítani kell a testek megfelelő megtámasztását is. A huzalok az egyik végükön be vannak falazva, vagyis az egyes pontok a véglapon nem tudnak sem elmozdulni, sem elfordulni.

A sodratszerkezet felépítéséhez először a belső réteget sodorjuk a maghuzalra, méghozzá az ezt alkotó 6 darab huzal szabad végét együtt, kinematikai előírás alapján vezérelve, egy adott tengelyirányú elfordulás értékkel, ami a korábban megadott sodrathosszt eredményezi. Ezután, külön lépésben hasonlóan járunk el a *B*, valamint a harmadik lépésben a *C* réteggel. A feladat jellegéből adódóan a szomszédos rétegek és huzalok egymással érintkezésben vannak. A valós viszonyoknak megfelelően a huzalok érintkezésekor nemcsak normálirányú erők

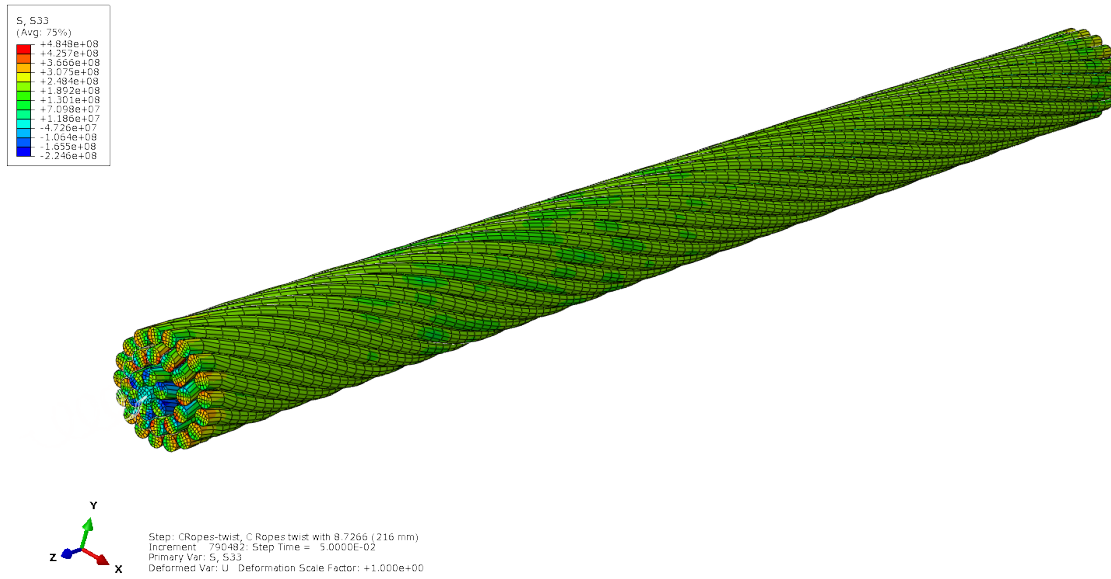
adódhatnak át, hanem a súrlódás miatt tangenciális erők is, ehhez $\mu = 0,1$ értékű súrlódási tényezővel számoltunk. A szimulációs modellt a 3. ábra szemlélteti, ahol a bal oldali véglapokon történtek a kinematikai előírások.



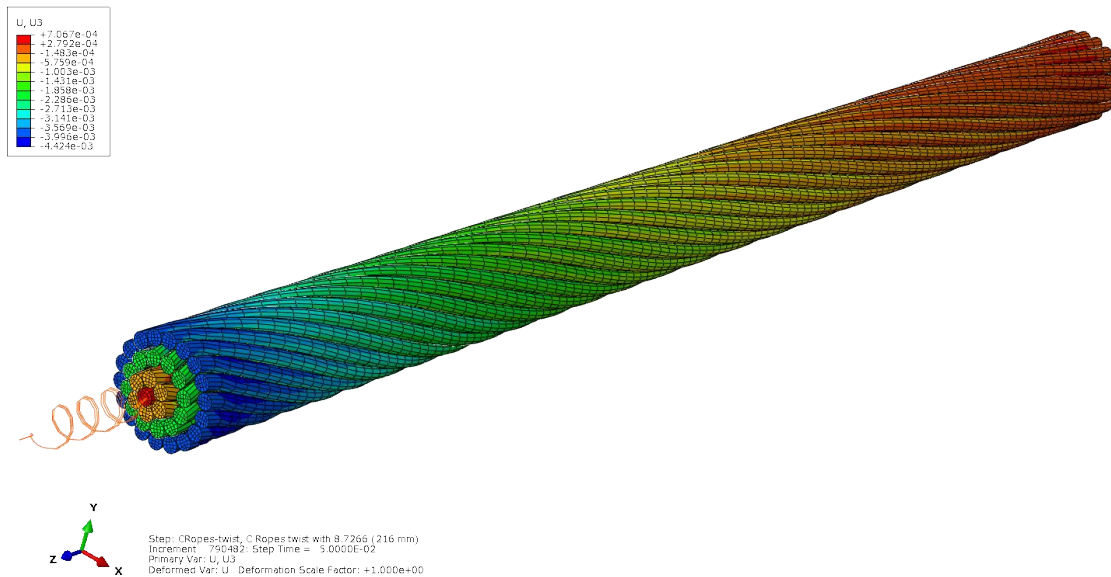
3. ábra: A kialakított geometria

A szimuláció során összeállított sodratszerkezetben kialakult tengelyirányú feszültségeket ($\sigma_z = S33$ [Pa]) tüntettük fel a 4. ábrán, valamint a tengelyirányú elmozdulásmező ($u_z = U3$ [m]) látható a 5. ábrán.

A gyártás során előállított sodratszerkezet nem lesz feszültségmentes. Valós körülmények között a maradó feszültségek nagyságára lehet következtetni abból, ha egy kisebb darabot kivágnak a legyártott termékből, melynek egyik végét szorosan összekötözik, hogy ne tudjanak a szálak egymáshoz képest elmozdulni, illetve elfordulni és megfigyelik a másik, felszabadított végen a mozgásokat, vagyis a huzalok szétnyílását. Ilyen módon egyfajta vizuális minősítést lehet végezni. Az elfogadási kritérium, hogy a szálak nem mozdulnak el, vagy ha igen, akkor kézzel a sodratszerkezetbe visszahelyezhetők.

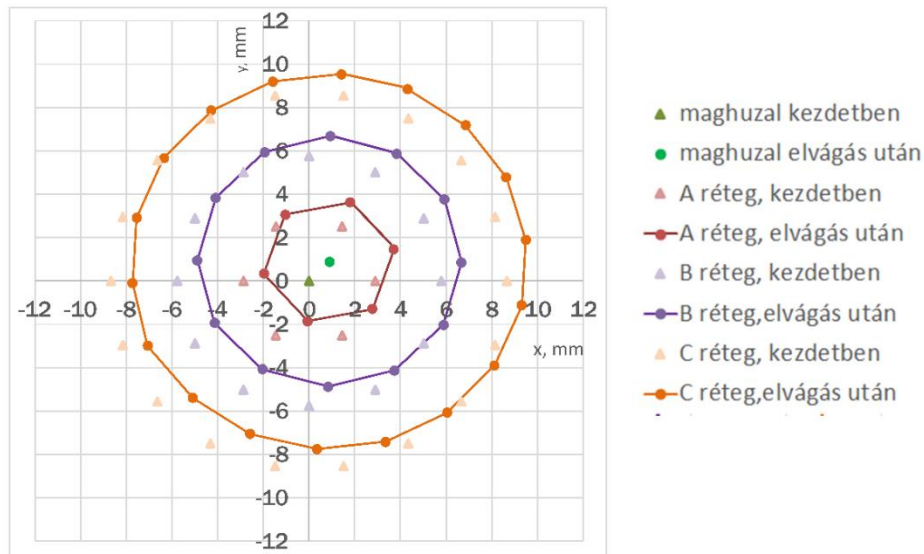


4. ábra: A tengelyirányú feszültség eloszlása



5. ábra: A tengelyirányú elmozdulás változása

Ezt a kísérletet úgy modelleztük, hogy a rétegek bal oldali véglapjain beállított kinematikai előírásokat felszabadítottuk és megkerestük a szerkezet új egyensúlyi állapotát, melyet a visszarugózások után vesz fel. Az 6. ábra az egyes huzalok súlypontjának helyzetét mutatja meg a kezdeti és visszarugózás utáni állapotban. A tengelyeken a síkbeli koordináták kerültek feltüntetésre, olyan módon, hogy az origó a maghuzal kezdeti súlypontjával esik egybe.



6. ábra: A huzalok súlypontjának helyzete kezdetben és a visszarugózás után

3 Összefoglalás

Alumínium távvezetékben mindig ébred maradó feszültség, ami a gyártásra vezethető vissza. Ennek minősítése, vizsgálata azonban jelenleg nem meghatározott mérhető vagy számolható kritériumok alapján történik. Tulajdonképpen egy vizuális ellenőrzés történik. Vizsgálatunkban szimulációs eljárással vizsgáljuk ezt a kérdéskört. A cikk az alumíniumból készült $37 \times 2,89$ mm sodratszerkezet végeselem-modelljét és szimulációját mutatta be háromdimenziós elemek használatával. A feladat jellegéből adódóan erősen nemlineáris mind geometriai, mind anyagi oldalról, valamint a változó érintkezési viszonyok okán is. A szimulációk során a kezdetben egyenes, feszültségmentes huzalokból előállítottuk a kész sodratszerkezetet, majd annak visszarugózás utáni egyensúlyi állapotát is megkerestük. Mind a modell számításai, mind mechanikai peremfeltételei megfelelnek az üzemi gyakorlatnak. Részletesen tanulmányozva a modellt megállapítottuk, hogy a számítások valóban tükrözik a huzalokban ébredő valós feszültségeket, miután az anyagmodellt pontosítottuk.

Mint a fenti elemzésből látható, a fejlesztési periódus előrevetít egy konkrét, gyakorlatban is alkalmazható vizsgálati eljárást. Ez az eljárás mind mérési módszerében, mind kiértékelési eljárásban modern, korszerű módszereket tartalmaz. Sem a berendezések, sem a kiértékelés szoftverei nem állnak általánosságban rendelkezésre egy vezetékgyártónál, azonban az éves becsült szükséges vizsgálati mintaszám ezt nem is teszi szükségessé. Ezek a feladatok megrendelhetők kutató/vizsgáló laboratóriumtól előre megadott protokoll szerint. A következő fejlesztési szakasz célja mindenképp az kell legyen, hogy ez a protokoll elkészüljön. Minősítő vizsgálathoz elfogadási kritérium is szükséges, ennek meghatározására azonban a korábbi vizsgálati eredmények lehetőséget adnak, amint a digitális ikermodell és az elmozdulások összehangolása megtörténik. Természetesen ez, ahogy a komplex vezeték vizsgálati szabványokban szokás, tehető egy ajánlás mellett a gyártó és a felhasználó közötti megegyezés eredményének is. Ezt a megoldást ajánljuk a készülő vizsgálati protokoll számára.

4 Köszönetnyilvánítás

Az Innovációs és Technológiai Minisztérium Kooperatív Doktori Program Doktori Hallgatói Ösztöndíj Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

A tématerületi kutatás a Miskolci Egyetem „Társadalmi hasznosság növelő fejlesztések a hazai felszín alatti természeti erőforrások hatékonyabb kiaknázása és hasznosítása területén” című, az Innovációs és Technológia Minisztérium Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal által kibocsátott támogatói okirat (Támogatói Okirat ikt. száma: TKP-17-1/PALY-2020) alapján zajló projektje részeként valósult meg.

5 Irodalomjegyzék

- [1] O. Konstatin Papailiou ed.: Overhead Lines, Cigré Green Books, Springer, (2017)
- [2] I. Gerdemeli, S. Kurt, A. S. Anil. Analysis with finite element method of wire rope. *Scientific Proceedings IX International Congress "Machines, Technologies, Materials"*. 2:107-110 (2012)
- [3] D. Wang, D. Zhang, S. Wang, S. Ge. Finite element analysis of hoisting rope and fretting wear evolution and fatigue life investigation of steel wires. *Engineering Failure Analysis*. 27:173-193 (2013)
- [4] N. Otano, D. Durville, H. Usabiaga. Finite element simulation of the mechanical behaviour of wire ropes, comparison with analytical models and experimental tests. *11th World Congress on Computational Mechanics*. pp.2 (2014)
- [5] M. Bechtold. Modeling of steel ropes. *SIMULIA Customer Conference*. pp.13 (2009)
- [6] I. Páczelt, R. Beleznai. Nonlinear contact-theory for analysis of wire rope strand using high-order approximation in the FEM. *Computers & Structures*. 89:1004-1025 (2011)
- [7] R. Beleznai, I. Páczelt. Design curve determination for two-layered wire rope strand using p -version finite element code. *Engineering with Computers*. 29:273-285 (2013)