

A végeelem analízis gerincgyógyászattal kapcsolatos kutatásokban történő alkalmazásának történelmi áttekintése

Historical overview of the application of finite element analysis in spine research

Turbucz Máté^{1,2}, Bereczki Ferenc^{1,2}, Hajnal Benjámin^{1,2}, Pokorni Ágoston Jakab^{1,2}, Varga Péter Pál³, Hoffer Zoltán³, Lazáry Áron^{3,4}, Éltes Péter Endre^{1,3,4}

1: In Silico Biomechanikai Laboratórium, Országos Gerincgyógyászati Központ

2: Semmelweis Egyetem, Klinikai Orvostudományok Doktori Iskola

3: Országos Gerincgyógyászati Központ

4: Semmelweis Egyetem, Gerincgyógyászati Tanszéki Csoport

turbucz95@gmail.com (első szerző)

Initially submitted Sept 15, 2021; accepted for publication Sept.28, 2021

Abstract

This study presents the Hungarian Society of Biomechanics and the work of Márta Kurutzné Kovács, who was the pioneer of spinal FE modelling in Hungary. She arranged the first Hungarian systematic literature review in this topic, which is still a valuable source for biomedical research engineers and clinicians.

In addition, FE models from the literature are introduced as well. The presented FE models help evaluate the biomechanical consequences of certain spinal surgeries and support the surgical planning based on the numerical results.

The final chapter introduces the activity of In Silico Biomechanics Laboratory, part of the National Center for Spinal Disorders Research and Development Department devoted to spine research.

Kulcsszavak

biomechanika, végeelem analízis, gerinc, történelmi áttekintés, modellezés

Keywords

biomechanics, finite element analysis, spine, historical overview, modelling

1. A végeelemes analízis szerepe a biomechanikában

A mozgás megértésére és feltérképezésére már a reneszánsz korban is kiemelt figyelmet fordítottak. Az első, témában megjelent jelentős könyv a XVII. század második felében született, *De motu animalium* címmel, Giovanni Alfonso Borelli (1608–1679) tollából [1]. A két kötetben (1680 és 1681) megjelent könyve az állatok mozgásával, illetve az izmok ernyedés-összehúzódás jellegű működésével foglalkozik (A). Később, XVIII. században Nicolas Andry (1658-1742) kísérletet tett a különböző mozgásszervi rendellenességek megértésére a mechanika irányából. Könyvében az ógörög *orthós* (egyenes, egyenesít), illetve *pais* (gyermek) szavak összevonásával megalkotta a könyv címének is adott *Orthopédie* szót, mely mára az ortopédia orvostudományi ágazat összefoglaló elnevezésévé vált. Könyve elsősorban szülőknek íródott, melyben az emberi anatómiáról, fejlődéséről, csontos struktúráról, illetve a különböző fejlődési rendellenességek korrigálásáról értekezik [2]. A folyamat – miszerint a test mechanikai módszerekkel vizsgálható – eredményeként a XX. századra megszületett a mérnöki tudományok új ága, a biomechanika. Ezen területen tevékenykedő orvosok, illetve mérnökök a szervezet reakcióját írják le a külső és belső erőhatásokra, a fizikai törvényeknek megfelelően [3].

<http://www.kaleidoscopehistory.hu>

Turbucz Máté, Bereczki Ferenc, Varga Péter Pál, Lazáry Áron, Éltes Péter Endre

A biomechanikai kutatásokban jelentős szerepet tölt be a végeselemes módszer (VEM). A VEM szilárdságtani és lengéstani mechanikával összefüggő numerikus módszerek körébe tartozó eljárás [4]. Alkalmazása elsőként a repülőgép iparban jelent meg, az 1950-es évek kezdetén. Azóta megkerülhetetlen elemmé vált a mérnöki tudományok területén. Alkalmazási területe magába foglalja többek között az űrtechnológiát, az autóipart, valamint az építészetet is, de általánosságban elmondható, hogy a tervezési, illetve optimalizációs folyamatok mára teljesen integrálták a módszert [4],[5].

A VEM első biomechanikai alkalmazása W.A.M. Brekelmans és munkatársaihoz köthető, 1972-ből. Közleményükben igazolták, hogy a módszer alkalmas a feszültségek, illetve alakváltozások meghatározására a combcsontban [4]. 2002-ben Michael J. Fagan és munkatársai közleményükben [5] bemutatták, hogy a VE módszer jól alkalmazható az egészséges, kóros, illetve sérült gerincszakasz biomechanikai viselkedésének megértéséhez. Fagan szerint a módszer segítségével limitálható a szükséges állati, illetve holttesti (*cadaver*) kísérletek száma. Az elmúlt évtizedekben számos olyan biomechanikai közlemény született, melyek tudományos vizsgáló módszere a végeselem analízis [4]. A XXI. századra a megnövekedett számítási kapacitásoknak köszönhetően, a komplex biomechanikai vizsgálatok is elterjedtek [5].

2. A kezdeti numerikus gerinc biomechanikai vizsgálatok Magyarországon

A Magyar Biomechanikai Társaság 2004-ben alakult meg, az I. Magyar Biomechanikai Konferencián, a magyarországi biomechanikai jellegű kutatómunkát végzők részvételével (B). Ma már több, mint száztagú társaság fő célja, hogy: „*megismertesse egymás tevékenységével a korábban sokszor elszigetelten dolgozó hazai kutatókat... új tudományos kapcsolatok létrehozását támogassa...*” (B).

A biomechanikával foglalkozó magyar kutatók közül kevesen készítettek végeselemes modell alapú tanulmányokat. Prof. Kurutzné Dr. Kovács Márta (MTA rendes tagja) Széchenyi-díjas építőmérnök, kinek gerinccel kapcsolatos biomechanikai vizsgálatai egyedülállóak és iskolateremtők Magyarországon. Munkássága nem csupán egy lumbális gerinc végeselem modellből áll, de elkészítette a témához kapcsolódó átfogó és alapos irodalom áttekintését és feldolgozását is. Ábrái, táblázatai mind a mai napig aktuálisak és hasznos kapaszkodók a szaporodó publikációk világában. A továbbiakban kicsit részletesebben szeretnénk bemutatni két könyvfejezetét.



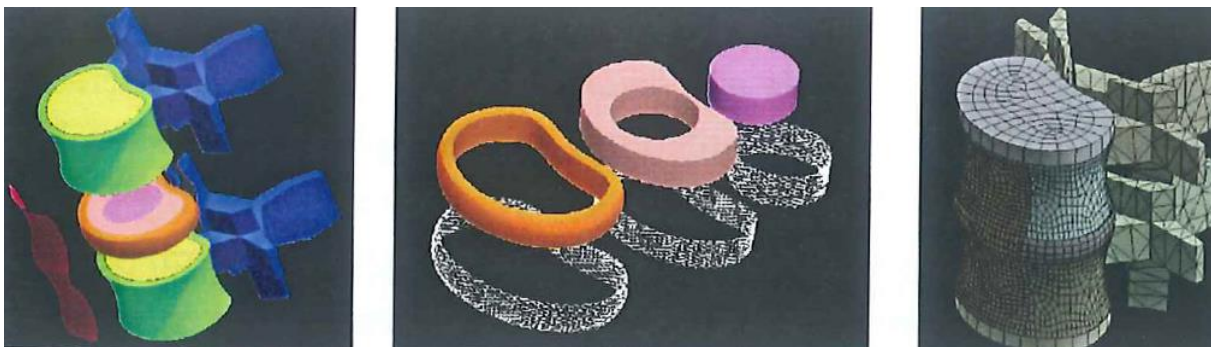
1. ábra: Prof. Kurutzné Dr. Kovács Márta (C)

<http://www.kaleidoscopehistory.hu>

Turbucz Máté, Bereczki Ferenc, Varga Péter Pál, Lazáry Áron, Éltes Péter Endre

Elsőként 2007-ben megjelent *Modellezés a Biomechanikában* című könyv 8. fejezetét, melynek címe *Az emberi gerinc modellezése* [6]. Ebben a könyvfejezetben a szerzők (Prof. Kurucz né Dr. Kovács Márta és Dr. Hoffer Zoltán) tárgyalják a gerinc biomechanikailag releváns anatómiáját, melynek alapos megértése és elsajátítása a modellezési folyamat alapfeltétele. A könyvfejezet felépítése szintén a modellezési logikát követi, hiszen a későbbi modellben különálló térfogatú egységeket fejezetenként mutatja be, ez a struktúra gyors és könnyű eligazodást jelent a modellező mérnökök számára. A műben nem csupán az anatómiai áttekintés érhető el, hanem a korábban publikált nemzetközi végelelemes modellekből készült összefoglaló táblázatok is. Ezen táblázatok a magyar nyelvű irodalomban egyedülállók. A könyv szerzője a modellezéshez szükséges anyagi jellemzőket, a különböző terhelési eseteket, illetve az eredmények kiértékeléséhez szükséges információkat jegyez le [6].

2012-ben jelent meg a *Biomechanikai modellezés* című könyv, Prof. Dr. Kiss Rita, a Magyar Biomechanikai Társaság jelenlegi elnöke szerkesztésével. A könyv 9. fejezete egy degeneratív gerinc végelelem modelljét mutatja be, mely Prof. Kurucz né Dr. Kovács Márta és Oroszváry László munkája 2010-ből. A VE modell részletes bemutatásától eltekintünk, azonban a 2. ábrán bemutatjuk. A könyvben ismertetett modell, valamint az ahhoz kapcsolódó szimulációk az addigi legösszetettebb gerinc VE tanulmánya a magyar biomechanika történetében [7].



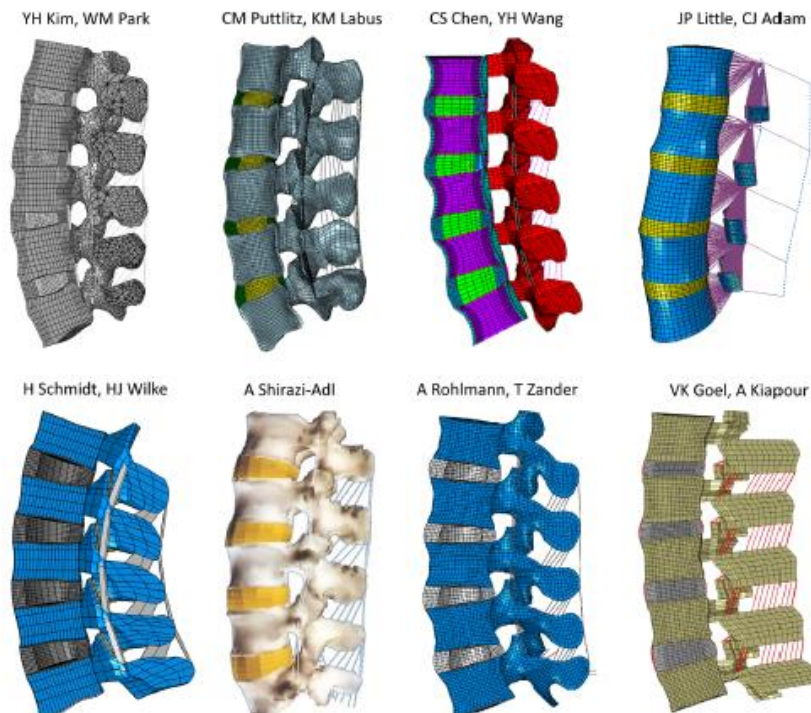
2. ábra: A mozgásszegmentum (b), A porckorong (k), a VE háló (j) [7]

Összegzésként elmondható, hogy Kurucz né Dr. Kovács Márta professzor asszony munkássága a magyar biomechanika egyik legjelentősebb munkája, mely mind a mai napig támaszt nyújt a gerincvégelelem témában kutató magyar mérnököknek, illetve orvosoknak.

3. Végelelemes analízis a gerincgyógyászatban

A személyre szabott, betegspecifikus gyógyászatra való igény megjelenének következtében, az „*in silico medicina*” térhódítása is elkezdődött. Ennek az új számítógépes szimulációs megközelítésnek az ismérve, hogy az emberi test tanulmányozását egy új kontextusba helyezi. A szimulációs eredmények elkészítésére szolgáló végelelemes modellek, illetve a 3D nyomtatás is szerves részét képezi az *in silico medicina*nak, mely alkalmazásával a személyre szabott műtéti eljárások, illetve kezelések elérhetővé válnak [8],[9],[10]. A 3D nyomtatás segítségével gyorsan, költséghatékonyan, illetve nagy pontossággal gyárthatók egyedi, összetett geometriák. A VEM, valamint a 3D nyomtatott eszközök alkalmazásából mind a betegek, mind a sebészek profitálnak, hiszen összetett műtéti tervek kidolgozásában nyújt segítséget [5],[11],[12],[13],[14]. Fontos, hogy ezen vizsgálatokat végző szakemberek, mind az orvosi, mind a mérnöki oldalról átlássák és megértsék a módszer felépítését, illetve a limitációit [4].

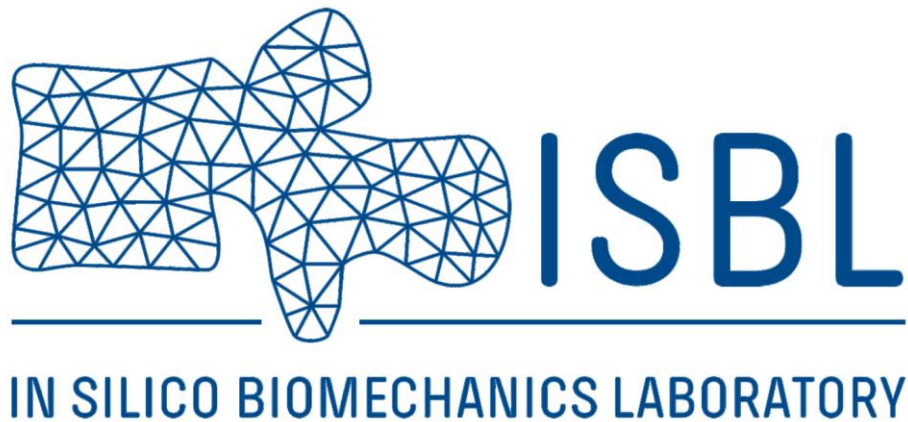
Ahogy arról a bevezetőben már esett szó a végeselemes analízis szerepe jelentősen megnövekedett az utóbbi évtizedekben. A módszer használata a gerincgyógyászatban is kiemelkedő jelentőséggel bír. 2014-ben jelent meg az első olyan összefoglaló cikk, amely a korábban publikált lumbális gerinc végeselem modelljeit hasonlítja össze. A cikkben nyolc különböző modell kerül bemutatásra alapos részletességgel, így annak bemutatásától most eltekintünk [15].



3. ábra: Nyolc, az irodalomban ismertetett lumbális gerinc végeselem modell [15]

Amennyiben a gerinc és a végeselem kapcsolatát vizsgáljuk, akkor azt tapasztaljuk, hogy 1970 és 2010 között megjelent publikációk önmagukban az egészséges, vagy degenerált gerinccel és annak megismerésével foglalkoznak [15]–[22]. Az utóbbi 10-15 évben több olyan publikáció is született, ahol a gerinc végeselemes modelljének segítségével különböző implantátumok kerültek ellenőrzésre, fejlesztésre [10],[11],[23]–[25]. Ez azt mutatja, hogy a közeljövőben számíthatunk arra, hogy az egyénspecifikus medicina jelentős fejlődésnek indul. E hatás mutatkozik meg Magyarországon is, hiszen 2018-ban megalakult az Országos Gerincgyógyászati Központ, Kutatás-Fejlesztés részlegének keretein belül az *In Silico Biomechanika Laboratórium (ISBL)*, melynek bemutatásával a következőkben foglalkozunk.

4. Az In Silico Biomechanika Laboratórium (ISBL) létrejötte és bemutatása

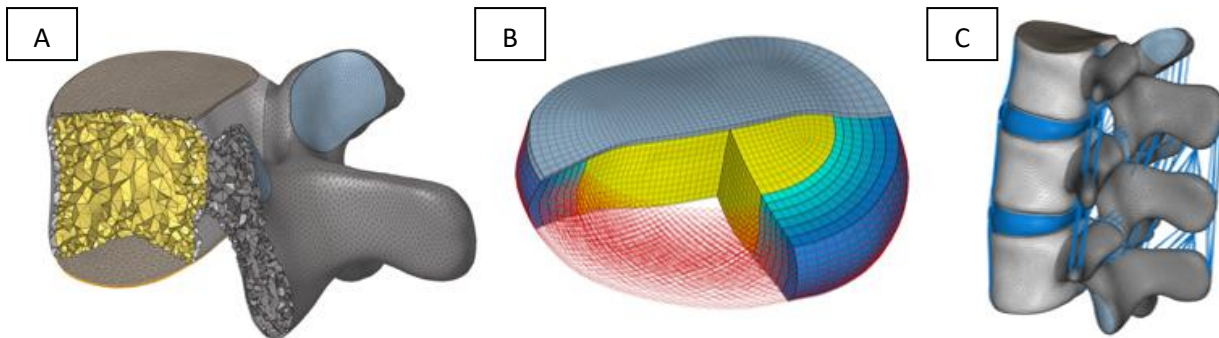


4. ábra: Az In Silico Biomechanika Laboratórium (ISBL) logója (D)

A magyarországi gerincsebészet élvonalát képviselő, európai szinten is elismert intézményben, az Országos Gerincgyógyászati Központban (OGK) került megalapításra az In Silico Biomechanikai Laboratórium (D) 2018-ban, Dr. Éltes Péter Endre laborvezető és Dr. Lazáry Áron tudományos igazgató erőfeszítéseinek köszönhetően, Dr. Varga Péter Pál OGK-főigazgató támogatásával. A labor létrejöttében Prof. Dr. Kiss Rita a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Mechatronika, Optika És Gépészeti Informatika Tanszékének egyetemi tanára folyamatos szakmai segítséget nyújtott. Egy olyan orvosokból, doktoranduszokból, illetve mérnökökből álló munkacsoport jött létre, melynek célja az emberi gerinc instabilitását okozó betegségek, továbbá a gerincsebészetben alkalmazott implantátumok, illetve műtéti beavatkozások biomechanikai vizsgálata.

A gerinc komplex deformitásainak, illetve fejlődési rendellenességeinek műtéti korrekciója mindig is nagy szakmai kihívást jelentettek a gerincsebészeknek [26]. A preoperatív műtéti tervezésben a hagyományos képalkotó vizsgálatok (röntgen, CT, MR) mellett jelentős segítséget nyújtanak a sebésznek a 3D számítógépes, vagy akár kézzel fogható, méretarányos 3D nyomtatott modellek. Ezekon a modelleken próbaműtétek is elvégezhetők, sterilizálható anyagból csavar-, valamint navigációs sablonokat lehet fejleszteni a minél jobb műtéti eredmény elérésének érdekében [27], [28]. Az intézeti gerincsebészeti ellátás támogatása mellett jelentős kutatási- és publikációs tevékenység fűződik a laboratóriumi munkához külföldi egyetemeken (pl. Bolognai Műszaki Egyetem – Iparmérnöki szak), oktatók és PhD hallgatók bevonásával. A kutatások közül kiemelendő a 3D nyomtatási módszerek eredményességének, költséghatékonyságának analízise [29], sacrectomiáknál és stabilizációs műtéteknél használt implantátumrendszerek végeelem analízise, valamint műtét hatására a gerincen bekövetkező geometriai változások leírása. A 2020-as évben készült el a laboratórium saját, nemzetközi standardok alapján *validált lumbális gerinc végeelem modellje* (5. ábra).

Az ISBL tudományos célkitűzése, hogy hidat képezzen a mérnöki tudományok és a klinikai orvostudomány között az innováció és a gyógyítás elősegítésének érdekében.



5. ábra: Az In Silico Biomechanika Laboratórium által kifejlesztett gerinc két mozgásszegmentumos véges elem modellje (A: csigolya, B: porckorong, C: mozgásszegmentummok) [30]

Irodalomjegyzék

- [1] M. H. Pope, “Giovanni Alfonso Borelli--the father of biomechanics.,” *Spine (Phila. Pa. 1976)*, vol. 30, no. 20, pp. 2350–2355, 2005. <https://doi.org/10.1097/01.brs.0000182314.49515.d8>
- [2] R. Kohler and L. P. Fischer, “Nicolas Andry (1658-1742) inventor of the term ‘orthopedics,’” *Ann. Chir.*, vol. 53, no. 4, pp. 335–339, 1999.
- [3] Á. Lazáry, P. E. Éltés, and P. P. Varga, “A MySpine project - funkcionális prognózis szimuláció lumbális degeneratív kórképekben,” *Gerincgyógyászati Szle.*, vol. May, pp. 18–20, 2015.
- [4] P. E. Éltés, Á. Lazáry, and P. P. Varga, “In silico biomechanikai vizsgálatok szerepe a gerincgyógyászatban,” *Gerincgyógyászati Szle.*, vol. November, 2015.
- [5] M. J. Fagan, S. Julian, and A. M. Mohsen, “Finite element analysis in spine research,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part H J. Eng. Med.*, vol. 216, no. 5, pp. 281–298, 2002. <https://doi.org/10.1243/09544110260216568>
- [6] M. Kurutzné Kovács and Z. Hoffer, “Modellezés a biomechanikában,” 2007, pp. 271–370.
- [7] R. M. Kiss, M. Kurutzné Kovács, and L. Oroszvály, “Biomechanikai modellezés,” 2012, pp. 153–185.
- [8] M. Viceconti, “Biomechanics-based in silico medicine: The manifesto of a new science,” *J. Biomech.*, vol. 48, no. 2, pp. 193–194, Jan. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2014.11.022>
- [9] V. K. Goel and E. Nyman, “Computational Modeling and Finite Element Analysis.,” *Spine (Phila. Pa. 1976)*, vol. 41 Suppl 7, pp. S6-7, Apr. 2016. <https://doi.org/10.1097/BRS.0000000000001421>
- [10] Y. Tong, D. J. Kaplan, J. M. Spivak, and J. A. Bendo, “Three-Dimensional Printing in Spine Surgery: A Review of Current Applications,” *Spine J.*, Nov. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.spinee.2019.11.004>
- [11] N. Xu *et al.*, “Reconstruction of the Upper Cervical Spine Using a Personalized 3D-Printed Vertebral Body in an Adolescent With Ewing Sarcoma.,” *Spine (Phila. Pa. 1976)*, vol. 41, no. 1, pp. E50-4, Jan. 2016. <https://doi.org/10.1097/BRS.0000000000001179>
- [12] F. Galbusera *et al.*, “Planning the Surgical Correction of Spinal Deformities: Toward the Identification of the Biomechanical Principles by Means of Numerical Simulation.,” *Front. Bioeng. Biotechnol.*, vol. 3, p. 178, Nov. 2015. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2015.00178>
- [13] J. Henao, C.-É. Aubin, H. Labelle, and P.-J. Arnoux, “Patient-specific finite element model of the spine and spinal cord to assess the neurological impact of scoliosis correction: preliminary application on two cases with and without intraoperative neurological complications.,” *Comput. Methods Biomech. Biomed. Engin.*, vol. 19, no. 8, pp. 901–10, Jun. 2016. <https://doi.org/10.1080/10255842.2015.1075010>
- [14] G. T. Klein, Y. Lu, and M. Y. Wang, “3D printing and neurosurgery--ready for prime time?,”

<http://www.kaleidoscopehistory.hu>

Turbucz Máté, Bereczki Ferenc, Varga Péter Pál, Lazáry Áron, Éltés Péter Endre

- World Neurosurg.*, vol. 80, no. 3–4, pp. 233–5, Sep. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2013.07.009>
- [15] M. Dreischarf *et al.*, “Comparison of eight published static finite element models of the intact lumbar spine: Predictive power of models improves when combined together,” *J. Biomech.*, vol. 47, no. 8, pp. 1757–1766, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2014.04.002>
- [16] A. Rohlmann, T. Zander, H. Schmidt, H. J. Wilke, and G. Bergmann, “Analysis of the influence of disc degeneration on the mechanical behaviour of a lumbar motion segment using the finite element method,” *J. Biomech.*, vol. 39, no. 13, pp. 2484–2490, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2005.07.026>
- [17] A. Rohlmann, T. Zander, M. Rao, and G. Bergmann, “Realistic loading conditions for upper body bending,” *J. Biomech.*, vol. 42, no. 7, pp. 884–890, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2009.01.017>
- [18] S. M. Finley *et al.*, “Engineering FEBio finite element models of the human lumbar spine,” *Comput. Methods Biomech. Biomed. Engin.*, vol. 21, no. 6, pp. 444–452, 2018. <https://doi.org/10.1080/10255842.2018.1478967>
- [19] A. Rohlmann, T. Zander, M. Rao, and G. Bergmann, “Applying a follower load delivers realistic results for simulating standing,” *J. Biomech.*, vol. 42, no. 10, pp. 1520–1526, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2009.03.048>
- [20] S. Naserkhaki, N. Arjmand, A. Shirazi-Adl, F. Farahmand, and M. El-Rich, “Effects of eight different ligament property datasets on biomechanics of a lumbar L4-L5 finite element model,” *J. Biomech.*, vol. 70, pp. 33–42, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2017.05.003>
- [21] A. Shirazi-Adl, “Biomechanics of the lumbar spine in sagittal/lateral moments,” *Spine*, vol. 19, no. 21, pp. 2407–2414, 1994. <https://doi.org/10.1097/00007632-199411000-00007>
- [22] F. Niemeyer, H. J. Wilke, and H. Schmidt, “Geometry strongly influences the response of numerical models of the lumbar spine-A probabilistic finite element analysis,” *J. Biomech.*, vol. 45, no. 8, pp. 1414–1423, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2012.02.021>
- [23] R. Zhu, L. M. Cheng, Y. Yu, T. Zander, B. Chen, and A. Rohlmann, “Comparison of four reconstruction methods after total sacrectomy: A finite element study,” *Clin. Biomech.*, vol. 27, no. 8, pp. 771–776, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2012.05.008>
- [24] C. Bruna-Rosso, P.-J. Arnoux, R.-J. Bianco, Y. Godio-Raboutet, L. Fradet, and C.-É. Aubin, “Finite Element Analysis of Sacroiliac Joint Fixation under Compression Loads,” *Int. J. Spine Surg.*, vol. 10, no. 16, 2016. <https://doi.org/10.14444/3016>
- [25] A. Ruggiero, M. Merola, and S. Affatato, “Finite element simulations of hard-on-soft hip joint prosthesis accounting for dynamic loads calculated from a Musculoskeletal model during walking,” *Materials (Basel)*, 2018. <https://doi.org/10.3390/ma11040574>
- [26] J. S. Smith *et al.*, “Rates and Causes of Mortality Associated With Spine Surgery Based on 108,419 Procedures,” *Spine (Phila. Pa. 1976)*, vol. 37, no. 23, pp. 1975–1982, Nov. 2012. <https://doi.org/10.1097/BRS.0b013e318257fada>
- [27] P. E. Éltés *et al.*, “Attitude of spine surgeons towards the application of 3d technologies-A survey of aospine members,” *Ideggyogy. Sz.*, vol. 72, no. 7–8, pp. 227–235, 2019. <https://doi.org/10.18071/isz.72.0227>
- [28] B. Wilcox, R. J. Mobbs, A.-M. Wu, and K. Phan, “Systematic review of 3D printing in spinal surgery: the current state of play,” *J. Spine Surg.*, vol. 3, no. 3, pp. 433–443, Sep. 2017. <https://doi.org/10.21037/jss.2017.09.01>
- [29] P. E. Eltes *et al.*, “Geometrical accuracy evaluation of an affordable 3D printing technology for spine physical models,” *J. Clin. Neurosci.*, vol. 72, pp. 438–446, Feb. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jocn.2019.12.027>

[30] F. Bereczki, M. Turbucz, R. Kiss, P. E. Eltes, and A. Lazary, “Stability Evaluation of Different Oblique Lumbar Interbody Fusion Constructs in Normal and Osteoporotic Condition – A Finite Element Based Study,” *Front. Bioeng. Biotechnol.*, vol. 9, no. November, pp. 1–12, 2021.

<https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.749914>

Internetes források

A: <https://hu.wikipedia.org/wiki/Biomechanika>

B: <http://biomechanica.hu/>

C: https://mta.hu/koztestuleti_tagok?PersonId=19220

D: www.isbl.hu

E: <https://cordis.europa.eu/project/id/269909>