

2015 október: Emberi szövetek modellezése - Bojtár Imre

Bojtár Imre professzor a Műegyetem Tartószerkezetek Mechanikája Tanszékének tanára. 2003-ban megalapította a BME Biomechanikai Kutatóközpontját, amelyet évekig ő irányított. Mostani NKFI-programja, a „Humán anyagok in vitro vizsgálata és azon alapuló anyagmodellek definiálása” 2016-tól „nagy összegű” támogatást élvez.

Professzor úr, kérem, avasson be a biomechanika szó jelentésébe, a tudományág fejlődésébe. Azt is szeretném megtudni, hogy mi vezetett a kutatóközpont megalakításához, milyen emlékezetes munkáik voltak eddig.



Bojtár Imre

A tudományág neve a „biológia” és a „mechanika” szavak összeolvadásából származik, a híres német fizikus, Hermann Helmholtz használta először a 19. században. A biomechanika a mechanika tudományának alkalmazása – általában élő – biológiai rendszerek vizsgálatára, mégpedig olyan vizsgálatára, amelyben a mechanikával foglalkozók korábban megszerzett tudásukat élettani kérdések megválaszolására használják, segítve az orvosok, biológusok munkáját. A biomechanikának vannak kifejezetten elméleti irányultságú ágai, amelyek azt vizsgálják, milyen mechanikai törvények alkalmazhatók a sejtek szintjétől kezdve a teljes szervezet mozgásának és egyéb jelenségeinek modellezésére. Emellett nagyon erős a gyakorlati ág: ennek az a célja, hogy az orvosok munkáját segítse a gyógyítás számos területén, megpróbálja leírni az emberi testrészek mozgását, érrendszerük, csontrendszerük, szövetek mechanikai működését.

A biomechanika gyökerei nagyon mélyre, sok ezer évre nyúlnak vissza. A mai értelmezés szerinti tudományág kibontakozása a 19. századhoz köthető. A 20. század második felében, főleg a számítástechnika fejlődésével érte el mostani szintjét. A világon sok-sok ezer kutató, mérnök és orvos foglalkozik már biomechanikával, ezzel a kifejezetten interdiszciplináris tudományággal: általában mérnökök és orvosok kutatócsoportjainak együttes munkájából születnek meg az elfogadható – gyakorlatban és elméletben alkalmazható – eredmények.

Nálunk, a Műegyetemen is több évtizede folynak ilyen kutatások. A korábban elszigetelt csoportok munkájából jött létre a kétezres évek elején a Biomechanikai Kutatóközpont. Szinte minden Karon foglalkoztak biomechanikával. A vegyészeknél a szövetek, biokémiai folyamatok elemzése; a gépészeknél a mozgásvizsgálatok, különböző mechanizmusok, protézisek kialakítása; a villamosmérnököknél az élettani jelek vizsgálata, a szabályozástechnika kapcsolódott ehhez az ághoz. Az építőmérnöki Mechanika Tanszéken már a kilencvenes évek elején elkezdtünk vizsgálni olyan feladatokat, amelyek főleg szilárdtest-technikai problémákkal voltak kapcsolatosak: elsősorban csontokat, protéziseket, főleg combcsont-protéziseket tanulmányoztunk – ez volt akkoriban az egyik legérdekesebb téma. Természetesen orvosokkal működtünk együtt, például kezdetben főleg a budapesti Ortopédiai Klinikával. Első munkáink numerikus szimulációk voltak, hiszen elsősorban numerikus modellezéssel foglalkozunk. A különböző típusú combcsont-protézisek biomechanikai kapcsolatait vizsgáltuk; megnéztük, milyen feszültségek, alakváltozások, elmozdulások lépnek fel bennük, milyen formájú protézissel lehet kialakítani a legkedvezőbb, legegyszerűsebb feszültségeloszlást, ami a protézis tartós illeszkedéséhez szükséges. Ebből a munkából aztán sok más kutatás fejlődött ki. Előkerültek például a fogak protézisei; majd gépész (áramlástannal foglalkozó) kutatókkal együtt érrendszereket, elsősorban sérült érszakaszokat (agyai és hasi aneurizmákat, érkítüremkedéseket) elemeztünk, együttműködve az Országos Idegsebészeti Tudományos Intézet, illetve a Semmelweis Egyetem Humán Élettani Intézetének munkatársaival. Egyre több szalon futott tovább az a mechanikai szimuláció, amely a kilencvenes években kezdődött el. Érdekes, speciális területekig is eljutottunk. Most például a (a Szemészeti Klinika orvosaival együtt) emberi szem numerikus modellezésén dolgozik az egyik kollégánk, aki éppen a PhD-védésére készül. Olyan szemmodellt hozott létre, amelyben a szemlencsétől kezdve a környező zsírpárnákig minden finom részlet szerepel. Modellje felhasználható lézersebészeti modellek szimulációira és egyes szemészeti kérdések, például a presbiópia, az öregszeműség vizsgálatára, a behelyezett műlencsék elemzésére.

Természetesen a kutatás nemcsak nálunk, hanem nagyon sok más tanszéken is fejlődött, így a 2000-es évek elején úgy gondoltuk, érdemes lenne koordinálni a munkát, hogy jobban megértsük egymás tevékenységét, és ha lehet, próbáljunk meg egymásnak segíteni, megismerve a szélesebb külső környezet munkáját is: más klinikákét, orvosokét, nem csak azokét, akikkel együtt dolgozunk. Ekkor született meg az egyetemi szintű kutatóközpont ötlete. Az egyetem vezetése rendelkezésünkre bocsátott egy néhány helyiségből álló részleget, ahol létrehozhattuk az első laborunkat. Pályázatok segítségével megindult a felszerelés beszerzése, és végül nagyon sok – több mint tíz – tanszék együttműködésével létrejött az egyetemi Biomechanikai Kutatóközpont. Kezdetben karoktól független szervezetenként pár évig én vezettem, aztán dr. Borbás Lajos váltott fel, most pedig dr. Kiss Rita professzor asszony irányítja. Ezzel párhuzamosan megpróbáltuk összefogni az országban hasonló témákban dolgozó kutatók munkáját. Megszerveztük az első Magyar Biomechanikai Konferenciát, az országban máshol (elsősorban a Debreceni Egyetemen dolgozó kutatókkal együtt) megalapítottuk a Magyar Biomechanikai Társaságot, és indítottunk egy lapot is, *Biomechanica Hungarica* címmel. A Biomechanikai Társaság és a folyóirat ma is létezik, a konferenciák folytatódnak. Országos szinten nem nagy ez a csapat, a Biomechanikai Társaságnak százegynéhány tagja van, de ez élő szervezet, új tagok kapcsolódnak hozzánk, lassan-lassan nemzetközi kapcsolatrendszer is kibontakozik.

A Biomechanikai Kutatóközpontban annyi szervezeti változás történt a közelmúltban, az egyetem belső struktúrájának átalakítása miatt, hogy most már nem független a karoktól, hanem a Gépészmérnöki Kar fogja össze a munkájában közreműködő tanszékek kutatásait s a tanszékek képviseltetik magukat a Kutatóközpont Tanácsában: ezért bekerült a nevébe a „kooperációs” jelző. A központ több sikeres pályázatot nyert el, legutóbb két NKFI-projektre kaptunk „nagy összegű” támogatást. Dr. Kiss Rita igazgató asszony a mozgásvizsgáló labor fejlesztését tűzte ki célul, a másik program vezetésére engem kértek meg. Ez a projekt is természetesen nagyon sok műegyetemi tanszék és orvos munkáját fogja össze.

A program a humán szövetek vizsgálatát hangsúlyozza, másrészt két anyagmodellből indul ki a szövetek anyagmodelljének megalkotásához. Hogyan „békíthetők” össze a különböző modellek?

Az anyagmodellek nem választhatók élesen szét egymástól, mert mindegyik azt próbálja meg követni, hogy az anyag hogyan válaszol valamilyen külső hatásra. Egy anyagmodell felépítése alapvetően attól függ, hogy milyen hatást

(mechanikai erőhatást vagy hőhatást stb.) tekintünk dominánsnak. Ha például rövid idejű hatást vizsgálunk, akkor az idő szerepe nem olyan fontos, de ha a hatás tartós, akkor előtérbe kerülnek a reológiai, időtől függő jelenségek. Hangsúlyozom, hogy itt ugyanannak az anyagnak más-más típusú válaszáról van szó. Az anyag egységes, és elvileg a mechanikai modellezésnek is egységesnek kellene lennie, de a numerikus lehetőségeink, a tudásunk korlátozott volta és néha az igények miatt egy-egy kérdésre keresünk csak lokálisan választ, s próbáljuk valamelyik esetet előtérbe helyezni. Így születnek a különböző típusú modellváltozatok, éreznünk kell azonban, hogy az egységes modell lenne az ideális. Ehhez nemcsak a biológiai, hanem a hagyományos anyagok esetében is korlátozottak a lehetőségeink, ezért alkalmazunk különböző modelleket ugyanarra az anyagra.

Térjünk vissza a kérdés elejére: a biomechanikai elemzések mindig humán szövetek elemzésével foglalkoztak – azokat az eseteket kivéve, amikor protézist, idegen anyagot vagy szövetet (például mesterséges inakat, csontszövetet) építenek be a szervezetbe. Kiemelkedően fontos szempont a biokompatibilitás – az, hogy az élő szervezet ne dobja ki, eltűrje vagy akár barátságosan fogadja az idegen anyagokat.

Mi ebben a projektben csak érintőlegesen foglalkozunk mesterséges anyagokkal, bár a mesterséges inak szerepelnek a listánkon, de főleg humán szövetek elemzését tűztük ki célul. Olyan adatbankot szeretnénk létrehozni, amely különböző típusú humán szövetek – bőr, izmok, inak, idegszálak, a szem különböző részei – anyagi tulajdonságait gyűjti össze, kategorizálja, és összehasonlítja a különböző tárolási módok okozta változásokat. Ezt az adatbankot az orvos- és mérnöktársadalom rendelkezésére bocsátjuk, hogy felhasználhassák a különböző numerikus modellekben. Rengeteg részeredmény született már a világon és nálunk is, de sok az ellentmondás közöttük, és kevés a szisztematikus munka.

Az adatgyűjtést nemcsak rövid idejű, kvázistatikus terhelésekre szeretnénk elvégezni, hanem reológiai, hosszú idejű, tartós hatást figyelembe vevő modelleket is vizsgálnánk. Az utóbbi feladat különösen izgalmas, mert az élő szövetminták tartós terhelése meglehetősen komplikált. Például ha egy acélmintát vetünk alá tartós terhelésnek, akár egy hónap múlva is megnézhetem, hogy mekkora a nyúlás. A biológiai bomlás viszont gyors folyamat, ezért új technikákat, illetve új modelleket kell kidolgoznunk. Gyakran magát a mérőberendezést is meg kell tervezni, mert ezeknek az anyagoknak a mérése gyökeresen különbözik egy hagyományos, szilárd anyag, például egy fém vagy beton mérésétől. Más környezetben kell dolgoznunk, mint a „hagyományos” mérnöki anyagok esetében. Például ha kivesz az ember egy érfaldarabot eredeti környezetéből, nem teheti be közvetlenül a hagyományos húzóberendezésbe, mert a kísérletet fizioiogiás sóoldatban – tartályban – kell elvégezni. Az előkészítés folyamata is nagyon kötött, hiszen ha megközelítően *in vivo* körülmények közötti adatokat akarunk nyerni, akkor a műtét után, fél órán-órán belül el kell kezdenünk a mérést. Ha ez nem megoldható, akkor felmerül a minta tárolásának a kérdése, meg kell néznünk, hogyan befolyásolja a tárolás az anyagi viselkedést, és így tovább. Ezért a látszólag egyszerű húzókísérlet megvalósítása is nagyon sok összetevőn múlik, és állandó orvosi felügyeletet, konzultációt igényel.

Véleményem szerint ez alaposan megtervezett munka, és bár a projekt csak januárban kezdődik, már most „elindulunk”: éppen tegnapelőtt tartottuk az alprojekt-vezetők első megbeszélését, ahol végiggondoltuk a teendőket, a következő hetekben pedig a témavezetők hozzákezdenek a részletes tervek kidolgozásához.

A következő kérdés: hogyan lehet ezeket a kísérleti eredményeket beépíteni a numerikus modellekbe? A modellalkotók kétfajta megközelítést használnak. Az egyik a kísérletek eredményeire épített, fenomenológiai (tapasztalati) modellezés, amely a makrokísérletek eredményeiből kíván numerikus modellt konstruálni a feszültségek és az alakváltozások közötti kapcsolatra – akár időfüggő, akár időfüggetlen változatban. A másik, az utóbbi évtizedekben előtérbe kerülő gondolkodásmód megpróbálja a mikrostruktúra hatását is figyelembe venni. Ezt más anyagok, például a fémek esetében is alkalmazzák – a rácsszerkezetet, vagy akár az atomi struktúrát próbálják valamilyen statisztikai homogenizációval átvinni a makroszintre. Az a cél, hogy ne csak a makrojelenségeket figyeljük meg az egyszerű laborkísérletben, hanem próbáljuk meg végiggondolni, mi történik „nagyon alacsony”, mikroszinten, és abból igyekezzünk felhasználható következtetéseket levonni a numerikus modellel.

Ezt a gondolatot a mostani vizsgálatunkba is szeretnénk bevonni. Mondok egy egyszerű példát: a legtöbb szövet, például az érfal szövete azért teherviselő és azért rugalmas, mert a többrétegű szövetrendszer belül kollagénszálak erősítik. Képzelnék el egy közönséges, kettős falú locsolócsövet, amelyben spirális szálak futnak. Az érfal is hasonló: ebben is van egy teherviselő kettős réteg, és mindkettőt spirális elhelyezkedésű, kollagén szálrendszer merevíti. A mikroszintű megközelítésben ezeket a szálakat, szálkötegeket modellezzük, és ép vagy roncsolódott állapotukkal próbáljuk értelmezni a szövetdarabok viselkedését.

A polimertechnikusok már több éve használnak nagyon ügyesen felépített kompozit-modelleket (például a dr. Vas László által kidolgozott „szálköteg-cella” modelleket) mesterségesen előállított és többé-kevésbé tervezett szálelrendezés esetében, ahol nagyjából tudják, hogy milyen a szálak irányítása, eloszlása; ebből a mikroszintű eloszlásból statisztikai úton becsülik a makroviselkedést. Mi megpróbáljuk ezt az eredetileg más anyagra alkalmazott mikromodellt beépíteni a humán szövetes változatba, és az eredményt összehasonlítjuk a hagyományos kontinuum-mechanikai modellekkel.

A munkánk akkor lesz sikeres, ha a mérnököknek azt mondhatjuk: kedves kollégák, itt van ez az adatbank, itt vannak az általunk jónak becsült numerikus modellek, tessék, használjátok – akár érfal-elemzésre, akár idegszál-elemzésre, akár a szem vizsgálatához. Természetesen képtelenség az emberi test minden szövetét megvizsgálnunk, de a rendelkezésre álló szövetekre előállítjuk az adatbankot, és egy következő generáció majd egy lépcsővel feljebb tovább folytatja...

Finomítják vagy verifikálják a modelleket?

A folytatás több ágon is elképzelhető. Az adatbankot nyilvánvalóan ki kell egészíteni más típusú szövetek bevonásával, és a mi méréseinkből nyert adatokat meg az általunk ajánlott numerikus modelleket érdemes tényleges vizsgálatokban, például ér- vagy protézis-szövet kapcsolat elemzésében felhasználni. Ez nem célunk ebben a projektben, hiszen mi előkészítő munkát végzünk mások számára, de reális továbblépés.

Hogyan nevelik ki a munkatársaikat, hogyan vonják be a hallgatókat ebbe a munkába?

Hála Istennek, igen nagy az érdeklődés a fiatalok körében, szinte minden Karon – a vegyészmérnököktől az építőmérnökökön, gépészmérnökön át a villamosmérnökökig. Akiket érdekel a numerikus modellezés, a mechanika, a laborvizsgálat, azok kifejezetten izgalmasnak találják ezt a munkát, mert itt a mechanika és a numerikus szimulációk nagyon különleges, sokszor talán legbonyolultabb problémái gyűlnek össze.

A másik, nem elhanyagolható szempont, hogy a munkánk mindig interdiszciplináris, és az is marad. Ezért a mérnök fiatalok „rákényszerülnek” arra, hogy más típusú – például fizikusi, orvosi – gondolkodásmódokat is megismerjenek. Szeretek kutatóorvosokkal együtt dolgozni, mert ők egészen másképp látják ugyanazt a problémát, mint mi. Határozottan állíthatom, hogy az elmúlt néhány évtizedben szellemileg az frissített fel a legjobban, hogy nem egy szűk szakterület kutatóival dolgoztam csak, akik szinte ugyanazt gondolják egy vizsgálatról, mint én, hanem egy csapattal – kísérletező emberekkel, numerikus modellezőkkel, sebészekkel, élettanászokkal, patológusokkal. Ez a „hatás” kívülről is érezhető: a hallgatók sokszor maguktól jönnek és kérnek feladatokat. Pár éve volt egy olyan építőmérnök-hallgató csapat, ahonnan egyszerre négyen-öten is jelentkeztek biomechanikai témájú diplomamunkára. Egyikük a combcsont dinamikus terhelésekre adott válaszát elemezte, a másik ínszalagokat mért, a harmadik a mellkast érő dinamikus hatásokat vizsgálta; szinte belevetették magukat a munkába.

A biomechanika szépségét abban látom, hogy elképesztően izgalmas, sokrétű és millió szállal kötődik a valósághoz. Még a legelvontabb részei is előbb-utóbb bekapcsolódnak abba az áramba, amely a gyógyítást, általában az élő rendszerek viselkedésének a megértését szolgálja. Talán emiatt is keres meg bennünket annyi kiváló hallgató.

Akik aztán elmennek, mert itthon nem tudják folytatni ezt a munkát...

Hadd mondjam el a kedvenc példámat. Évekkel ezelőtt eljött hozzám egy aranyos, okos kislány, aki TDK-zni akart. Akkor kezdtük el a szemlencse háromdimenziós numerikus szimulációját, és ő ügyes szemmodellt készített – nem olyan bonyolultat, mint a mostani PhD-hallgatóm, de az akkoriban újdonság volt. Előadást tartott egy szemészeti konferencián, külföldre is meghívták, cikke jelent meg, értékes eredményei voltak. Sajnos, nem jöhetett el hozzánk doktorandusznak, mert el kellett tartania a családját. Jelentkezett egy londoni központú, alagutakat és hidakat tervező, óriási cég magyarországi pályázatára (a cégnek itt is van egy fiókirodája). A több mint harminc jelentkező közül egyet vettek fel: őt. Azért, mert amikor megmutatta a munkáit, azt mondták neki, hogy ha ezt a nemlineáris feladatot, a szemvizsgálatot meg tudja oldani, akkor alagutat is tud tervezni. Ma már jórészt Londonban él, de szerte a világon tervezett. Azóta is nagyszerű emlékként őrzi az itteni munkát. Nem ő az egyetlen. Anyagi okok miatt egy kezdetben combcsonttal foglalkozó fiúnak is el kellett mennie a „klasszikus” ipari tervezésbe: azóta sok hongkongi alagút, híd részben az ő tervezőmunkája alapján épült meg. A fiú remek cikkeket írt combcsont-vizsgálatból, akkor tanult bele a nemlineáris végelelemes modellezésbe.

A biomechanikai modellezéssel, laborkísérletekkel szerzett tapasztalat jó iskola akkor is, ha valakinek a biomechanikán kívül kell megtalálnia a megélhetéséhez szükséges lehetőségeket.

Silberer Vera