

Hemo- és hidrodinamikai rendszerek numerikus és kísérleti vizsgálata 2005-2009.

A pályázat beadásakor így fogalmaztuk meg a kutatási célt:

„Felismerve a közös fizikai-matematikai alapokat, célunk egy moduláris felépítésű általános programcsomag létrehozása, amelyben az egyes elemek matematikai modelljét kísérletekkel ellenőriztük. A program alkalmazásával lehetőségünk nyílik

- vizsgálni a teljes érhalózat (artériás és vénás, kis és nagy vérkör) áramlástan jellemzőit és elősegíteni a tipikus érhalózati megbetegedések diagnosztizálását vérnyomásmérés módszerével,
- vizsgálni az acélcsővekből és hidraulika tömlőkből, szervó-, út-, és egyéb szelepekből, munkahengerekből felépített hidraulikus rendszer tranziens folyamatait, stabilitási kérdéseit.”

A pályázatban megfogalmazott kutatási céllal összhangban egy olyan moduláris felépítésű programcsomagot készítettünk el, mely alkalmas különböző fizikai hátterű, de hasonló logikai felépítésű áramlástechnikai hálózatok dinamikus vizsgálatára. A programcsomagot Matlab környezetben kódoltuk. Jelenleg az alábbi elemkönyvtárak állnak rendelkezésre:

- **érhalózatok elemei:** viszkoelasztikus cső, szív, stb.
- **olajhidraulikus hálózatok:** munkahenger, volumetrikus szivattyú, útváltó, nyomáshatároló szelep, térfogatáram állandósító szelep, stb.
- **nyomottvízes ivóvízhálózat elemek:** szivattyú, lineárisan rugalmas anyagú cső, visszacsapó szelep, nyomásszabályzó, légüst, stb.
- **szennyvíz- és csatornahálózatok elemei:** nyíltfelszínű prizmatikus csatorna, akna, oldalbukó, stb.

Bár a pályázat beadásakor csupán az első két elemcsoport megvalósítását terveztük, az ipari partnerek felől érkező igények, ill. az oktatási feladatok (TDK dolgozatok, diplomatervek) hatására a két utóbbi elemcsaládot is kidolgoztuk.

A programcsomag részét képezi továbbá egy 50 oldalas felhasználói kézikönyv és egy 12 feladatból álló bevezető példatár ("tutorial").

A programcsomagot az elmúlt öt évben 3 doktori kutatás, 4 diplomaterv, ill. 6 hallgatói projektfeladat során használtuk. Az elmúlt 5 évben 8 ipari munka során alkalmaztuk a szoftvert.

I. Hidraulikus rendszerek dinamikus szimulációja terén végzett kutatások

A kidolgozott olaj hidraulikus elemkészlet:

- **Hidraulika cső:** Lineárisan rugalmas, elosztott paraméterű cső lineárisan rugalmas közeggel.
- **Fogaskerék szivattyú:** periodikusan szállító szivattyú (időben változó térfogatáram peremfeltétel).
- **Nyomáshatároló szelep:** dinamikus áramlástechnikai - mechanikai modell.
- **Térfogatáram állandósító szelep:** dinamikus áramlástechnikai - mechanikai modell.
- **Munkahenger:** dinamikus modell, a mozgásegyenletek mellett a kamranyomások időfüggő megoldása, méréseken alapuló súrlódási modellel.

Kutatási eredmények részletezése:

1. **Mérések.** Kísérleti berendezést építettünk hidraulikus rendszerekben lejátszódó dinamikus jelenségek vizsgálatához. A berendezés három fő részből áll: (a) munkahenger mérőkör (b) nyomáshatároló szelep mérőkör és (c) a mindkét berendezést kiszolgáló tápegység ill. segédberendezések (olajtartály, szűrő, stb.).

a. A munkahenger mérőkörön egy arányos szelep segítségével számítógépen keresztül állítható be a függőleges elrendezésű munkahenger mozgási sebessége különböző súlyterhelések esetén. Nyomásmérési lehetőséget építettünk ki a munkahenger két kamrájához ill. az elmozdulás is mérhető. Az adatgyűjtő szoftver lehetőséget ad a munkahengert vezérlő arányos szelep működtetésére is, így a visszacsatolás is megoldott pl. pozíciószabályzó algoritmusok vizsgálatához. A berendezésen három kísérletsorozatot végeztünk el.

i. A dugattyúra ható súrlódó erő mérése. Ez az erő a két kamranyomástól, ill. a mozgási sebességtől függ (az anyagjellemzők és a geometriai kialakítás mellett). A mérési eredményeket dimenziótlan összefüggések segítségével értékeltük ki, így azok egyszerűen alkalmazhatók más típusú, de hasonló geometriai kialakítású munkahengerek esetén is.

ii. A már elkészült szimulátort teszteltük munkahenger hirtelen

indítása és megállítása miatt lejátszódó hidraulikus tranziensek esetén. A mért és számított értékek (nyomásjelek és elmozdulásjelek) összehasonlítása során azt tapasztaltuk, hogy bár a számított nyomáscsúcsok „erős” tranziensek során túlbecsülik a mért értékeket, az elmozdulásjelek ilyen esetben is jól egyeznek.

iii. A szimulátoron végeztünk olyan kísérleteket is, melyek során a pozíciószabályozás algoritmusát teszteltük, azaz az előzőekben validált szimulációs modellbe beépítettük a visszacsatolásos szabályzást (PID szabályzó). A szimulátor segítségével a berendezés veszélyeztetése nélkül el tudtuk végezni a szabályzó paramétereinek durva hangolását.

b. A nyomáshatároló szelep modellezése során méréseket végeztünk egy valós ipari szelepen valamint egy, a tanszéken speciálisan kutatási célokhoz tervezett és gyártott szelepen is. Az első szelepen a szimulátor számára kifejlesztett numerikus modellt teszteltük önállóan (a többi modellezett elemtől elválasztva). A második szelepen (az egyszerű szerkezeti kialakítása miatt) a szelep statikus jelleggörbéit mértük.

2. **Modellfejlesztés.** A dinamikus hatásokat figyelembe véve továbbfejlesztettük a hidraulikus nyomáshatároló szelepek, térfogatáram állandósító szelepek és munkahengerek matematikai modelljét, a modelleket mérésekkel ellenőriztük.

a. A nyomáshatároló szelep modellezése során részletesen megvizsgáltuk a statikus jelleggörbék számításának lehetőségét. Ezeket a mennyiségeket kiszámítottuk (a) hagyományos közelítő analitikus módszerekkel és (b) háromdimenziós numerikus áramlástanai módszerrel (CFD). A számítási eredményeket összevetettük mérési eredményekkel. Különösen hangsúlyosan vizsgáltuk a szelepülék különböző geometriai kialakításait. A vizsgálat eredményeképpen egy mérésekkel validált, egyszerű, de pontos nyomáshatároló modellt építettünk be a szimulátorba.

b. Hidraulika csövekben lejátszódó dinamikus jelenségek szimulációja esetén fontos a nyomáshullámok megfelelő idő- és térbeli felbontása, ugyanakkor szem előtt kell tartani a számítás időigényét is. Szisztematikusan megvizsgáltuk a lehetséges térbeli és időbeli

diszkretizációs sémákat és összehasonlítottuk ezeknek különböző kombinációit. A tesztelés eredményeképpen kiválasztottuk azt a két sémát, mely ésszerű egyensúlyt tart a számítás pontossága és időigénye között.

c. Szintén hidraulika csövek esetén merül fel a sűrűlódás modellezésének problematikája, mivel a széles körben elterjedt formulák (Colbrook-White, Powell) állandósult állapotra lettek kalibrálva. Az irodalomból kiválasztottunk három instacionárius sűrűlódási modellt, ezeket implementáltuk az előzőekben említett numerikus sémákba és az eredményeket mérésekkel hasonlítottuk össze. A szimulátorba végül csak a legpontosabbat építettük be véglegesen.

II. Hemodinamikai kutatások és eredmények

A kutatás céljai között szerepelt a teljes érhálózat áramlási jellemzőinek vizsgálata és számítása. A vizsgálatok szempontjából kezdetben különválasztottuk egymástól az artériás és a vénás rendszert. A kutatási periódus végére felépített programcsomag egyaránt alkalmas mindkét alrendszerbeli áramlási folyamatok szimulálására.

Az érfal nemlineáris mechanikai tulajdonságokkal rendelkezik, az érfal deformációja egyaránt függvénye a transzmurális nyomásnak és az időnek. A véráramlás modellezéséhez ezért viszkoelasztikus anyagmodellt kell alkalmazni. Első lépésben egy olyan matematikai modell létrehozása volt a cél, amely viszkoelasztikus csőhálózatban képes leírni a folyadéksebesség, a nyomás és az átmérő időbeli változását.

1. A viszkoelasztikus anyagmodell (Stuart modell)

A viszkoelasztikus falú csőben történő egydimenziós áramlás leírásához a Stuart modellt használtuk fel. A Stuart modell egy rugalmas elem és egy Kelvin-Voigt elem sorba kapcsolásából áll. A Kelvin-Voigt elem egy újabb rugalmas elem és egy csillapítás párhuzamos kapcsolásával hozható létre.

A modell leíró differenciálegyenletét a kontinuitási egyenlettel kombinálva létrehoztunk egy módosított kontinuitási egyenletet. A módosított kontinuitási egyenlet és a mozgásegyenlet által alkotott parciális differenciálegyenlet-rendszert a karakterisztikák módszerével oldottuk meg. Ehhez egy különálló számítógépes prog-

ramot fejlesztettünk ki, amely alkalmas volt egy viszkoelasztikus érszakaszban az egy dimenziós áramlás számítására.

A programot egy szilikon csőszakaszra végrehajtott mérés eredményeivel validáltuk. A mérésből rendelkezésre álltak a cső elején és végén rögzített nyomások az idő függvényében. A programban létrehoztunk egy a mérésben alkalmazott szilikon csővel megegyező geometriájú csőszakaszt. A szakasz elejére peremfeltételként a mérésből származó nyomásjelet adtuk meg. A számítást lefuttatva összevetettük egymással a cső végi mért és számolt nyomásokat. Az eredmények azt mutatták, hogy a számolt nyomások igen jól közelítik a mért értékeket. Különösen igaz ez a nagyobb frekvenciájú impulzusokra.

Következő lépésben a validált anyagmodellt beépítettük a szimulációs programcsomagba. A programcsomag viszkoelasztikus moduljának teszteléséhez próbaszámításokat végeztünk egy közepes méretű (16 csomópontból és 25 viszkoelasztikus ágból álló) hálózaton. Az eredmények jól mutatták a viszkoelaszticitás csillapító hatását, az első pontban peremfeltételként megadott nyomásimpulzusok jelentős mértékben csillapodnak a kifolyás felé haladva. A modul validálásához felépítettünk egy vékonyfalú szilikon csövekből álló hálózatot. A hálózat különböző pontjain nyomástávadókkal mértük a nyomást, miközben egy periodikusan változó nyomásgerjesztést adtunk a hálózat egyik felnyitóágára. A mérési értékeket összevetettük a viszkoelasztikus modullal számolt eredményekkel, az egyezést azonban nem találtuk kielégítőnek. A Stuart féle háromparaméteres anyagmodellt kiegészítettük egy ötparaméteres anyagmodellre és így folytatjuk a számításainkat.

2. A centrális és perifériás vérnyomás kapcsolata

A pályázat kutatási tervének összeállításakor mi nem érzékeltük, de kutatóorvosokkal való együttműködés során tapasztaltuk, hogy ők egy jól működő érhálózat-modell legfontosabb felhasználását abban látják, hogy kapcsolatot teremt a perifériás és centrális vérnyomás között. Az orvos általában periférián tudja mérni a vérnyomást (felkar, csukló, ujjbegy, stb.), de a vérnyomás-csökkentő gyógyszerek dózisát és hatását a centrális (szív közeli) vérnyomás alapján kell meghatározniuk. Ezért volna fontos egy olyan módszer kidolgozása, amely a perifériás vérnyomás ismeretében ad becslést a centrális vérnyomás változására.

A fent ismertetett programcsomag centrális → perifériás irányban megoldja a feladatot, de kidolgoztunk egy számítási módszert, amely visszafelé, perifériás →

centrális irányban működik. Egyszerű anyagmodell esetén egy TDK dolgozat keretében már kipróbáltuk a módszert, jelenleg a viszkoelasztikus anyagmodell használatával pontosítjuk az eljárást.

A módszer eredménye és használhatósága érdeklődésre tart számot az kutatóorvosok között, ezért az eljárás fejlesztése (és remélhetőleg klinikai tesztelése) az OTKA kutatás lezárása után is folytatódik.

3. *Az érfal összeroppanás vizsgálata*

A vénás véráramlás fenntartásában nagy szerephez jutnak a vénaszakaszokat körülvevő izmok és artériák. Az izmok összehúzódása és elernyedése, illetve az artériák pulzálása okozza az érszakaszok periodikus összenyomódását. A vér visszáramlását vénás billentyűk akadályozzák meg. A kutatásunk során ezt a jelenséget reprodukáltuk laboratóriumi körülmények között. Vízrel töltött plexi tartályon keresztül vezetünk egy vékonyfalú szilikon csövet, amely a vénás érszakaszt hivatott modellezni, az átlátszó fal lehetővé tette az összeroppanás optikai úton történő megfigyelést.

A berendezésen végzett alapkísérletek az irodalommal jól egyező eredményt mutattak (állandó tartálynomás és változó térfogatáram hatására deformálódó, majd összeroppanó cső ellenállása). Az irodalomban nem ismert esetek vizsgálata jelenleg is folyik: a vénás billentyűket visszacsapó szelepekkel modelleztük, egy nyomásjel-generátorral időben változó, periodikus nyomásváltozást hoztunk létre a tartályban. Ennek hatására a vékonyfalú csőszakasz ismétlődően összenyomódik, majd elernyed. A beépített visszacsapó szelepeknek köszönhetően a csőszakaszban levő víz csak egy irányban áramolhat, így a vénás áramláshoz hasonló jelenséget tudtunk előidézni. Az első méréssorozat eredményét egy első díjas TDK dolgozat mutatja, de ezek a kísérletek az OTKA jelentés lezárását követően is folytatódnak.

Az élő szervezetben a vénákat deformáló izmok hatása közvetlenül nem mérhető, csak az mozgásanalízis kapcsán nyert izom-aktivitási mérésekből következtethetünk a deformáló hatásra. Ezért ki kellett dolgoznunk egy módszert, amely olyan változók közötti kapcsolat vizsgálatára alkalmas, ahol a kapcsolat jellege részben determinisztikus részben véletlenszerű. Ilyen típusú kapcsolatok elemzésére a Fuzzylogikára támaszkodó eljárások alkalmasak. A mozgás-izomaktivitás-vénadeformáció kapcsolatot szem előtt tartva kidolgoztunk egy számunkra hasznos eljárást. A számítási módszer kidolgozása jól sikerült és más hasonló jelenségek elemzésére is alkalmas lett. Ezzel az eljárással adtunk becslést a napi középhőmérséklet – csapadék

- városi vízfogyasztás kapcsolatra, és a tanulmányt azonnal közölte az AQUA (IF=0.626) folyóirat.

4. Véráramlás vizsgálata patkányvénákban

A vénás véráramlás matematikai modelljének felépítéséhez mindenképpen szükséges valódi vénák vizsgálata. Ehhez a Semmelweis Orvostudományi Egyetem Klinikai Kísérleti Kutató- és Humán Élettani Intézetével folytattunk közös kutatásokat. Az Intézet munkatársai már a korábbiakban számos in vivo kísérletet végeztek patkányvénákon. A véráramlás sebességét úgy határozták meg, hogy a preparált szakaszokba fiziológiás sóoldatot juttattak, és a front haladását digitális kamerával rögzítették.

Részt vettünk e kísérletekben, és kifejlesztettünk egy olyan eljárást, amely az egymást követő képek közötti keresztkorrelációs görbe felhasználásával számítja ki a folyadékcsomagok elmozdulását, majd a sebességet. Az eljárás nagy részét sikerült automatizálni, ami lehetővé teszi a kiértékelés gyorsabb végrehajtását.

A felvételek kiértékelését nagymértékben megnehezítette azok rossz minősége. A javaslatunkra átalakították a berendezést és megvalósították a felvétel közvetlenül a számítógépre történő rögzítését. Ennek eredményeképpen a felvételek minősége (kontraszt, élesség) javult, amely pontosabbá teheti a vérssebesség meghatározására kifejlesztett eljárást.

A deformálódó szilikoncsövek alakváltozásának mérésére nagyfrekvenciás felvételeket készítettünk és kiértékeljük a digitális képfeldolgozás eszközeivel. Ez az eljárás néhány önálló publikációt is eredményezett, és az e téren szerzett ismeretek nagyban hozzájárult ahhoz, hogy a Humán Élettani Intézetrel végzett közös munkánkban eredményesek tudtunk lenni.

A kísérletek kiértékeléséhez használt képfeldolgozó eljárást és kísérletek eredményét tartalmazó folyóiratcikk készülségi foka 80%.

5. Vénabillentyűk modellezése

A vénákkal kapcsolatos fontos terület a vénabillentyűk működése. Az 1D modellekben úgy tekintettük ezeket az elemeket, mint közönséges visszacsapó szelepek, a valóságban azonban sokkal bonyolultabb geometriával és működéssel rendelkeznek. A részletes vizsgálathoz elkészítettük a billentyűk 3 dimenziós modelljét. A célunk úgynevezett kapcsolt szimulációk (FSI - Fluid Structure Interaction) végrehajtása. Ehhez első lépésben el kellett készíteni az áramlási és a billentyűk numerikus hálóját. A periodikusan változó cső eleji nyomás hatására a billentyűk rendre

kinyílnak, majd összecsucódnak. A számításokban sikerült megvalósítani ezt a mozgást, azonban a billentyűk nem képesek teljes mértékben kinyílni. A vizsgálatokat módosított geometriával folytatjuk, az eredmények a közeljövőben várhatók.

Témavezetőként így értékelem a kutatást:

- az alapvető célt elértük: kialakult egy egységes szimulációs eljárás, amely, víz-, olaj-, csatorna-, artériás és vénás hálózat tranziens folyamatainak számítására egyaránt alkalmas. Természetesen ez egy állandóan fejlődő, bővülő kód, amelyet a tanszéki oktatók, doktoranduszok, hallgatók használnak oktató és kutatómunkájukban, valamint ipari megbízásokban is.
- vannak olyan részek, ahol nem értük el a kitűzött célt, pl. a vénás hálózat szimulációja még sok munkát kíván, és még nem sikerült összekapcsolni az artériás és vénás áramlási kört
- vannak olyan részek, ahol sokkal több munkát végeztünk, mint ami a tervezett kutatási programban szerepelt. Ilyenek a nyíltfelszínű (csatorna) áramlások szimulációja, a centrális és perifériás vérnyomás kapcsolatának vizsgálata, a digitális képfeldolgozással nyert eredmények és az együttműködés a Semmelweis Orvostudományi Egyetem Humán Élettani Intézetével.

Tanszéki munkatársaim, doktorandusz hallgatók és én is örömmel dolgoztunk ezen a mindannyiunkat érdeklő témán, és köszönjük az OTKA támogatását, amely ezt lehetővé tette.

2010. február 18.

Dr. Halász Gábor témavezető