

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
Infotehnoloogia teaduskond
Thomas Johann Seebecki elektroonikainstituut

IEE40LT

Heidy Mustkivi 134967

KÄE RADIAALARTERI PULSILAINE ARVUTIMUDEL MULTISENSOORIKA ARENDAMISEKS

Bakalaureusetöö

Juhendajad: Rauno Gordon
Doktor
Vanemteadur
Hip Kõiv, MSc

Tallinn 2016

Autorideklaratsioon

Kinnitan, et olen koostanud antud lõputöö iseseisvalt ning seda ei ole kellegi teise poolt varem kaitsmisele esitatud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on töös viidatud.

Autor: Heidy Mustkivi

06.06.2016

Ülesande püstitus

Teema: Käe radiaalarteri pulsiline arvutimudel multisensorika arendamiseks

Juhendajad: vanemteadur Rauno Gordon, Hip Kõiv

Ülesanne: Käe radiaalarteri pulsiline modelleerimine pulsiline karakteristikute mõõtmiseks ning võrdlemiseks kirjandusest pärit tulemustega. Karakteristikute mõõtmine randmelt.

Eesmärgid: Soov on tuvastada veresoonekonna dünaamilisi näitajaid randmelt multisensorika abil. Hiljem siduda dünaamilised näitajad aordirõhuga. Tuvastamiseks on kasutamisel optilised sensorid ja impedantselektroodid. Mõõtmiste käigus uuritakse veresoone elastsust ja dünaamikat.

Luu kontrollmeetod füüsilisele käe mudelile.

Oodatav tulemus: Oodatavaks tulemuseks on arvutimudel, mis on kontrollitud/testitud võrdlusega ja selle toimimine on võrreldav kirjandusest leitavate väärtustega.

Metoodika: Loomisele tuleb Matlabi mudel, millest saadud tulemusi saab kontrollida reaalse väärtustega.

Annotatsioon

Käesolev bakalaureusetöö uurib vere ja selle dünaamika, veresoonte ning vererõhu kohta olemasolevat informatsiooni, mida kasutada edasises töös. Bakalaureusetöö eesmärgiks on luua pulsiline arvutimudel, mille põhjal saaks hiljem uurida ja tuvastada veresoonkonna näitajaid randmelt. Töö ülesandeks on pulsiline modelleerimine ning saadud tulemuste võrdlemine kirjanduses leitavaga.

Lõputöö on kirjutatud eesti keeles ning sisaldab teksti 37 leheküljel, 4 peatükki, 17 joonist, 1 tabelit.

Abstract

Computer model of pulse wave in radial artery for the development of multisensorics

This bachelor thesis researches information about blood vessels, blood pressure and blood and its dynamics to use in further work. The purpose of this thesis is to create a computer model of pulse wave that could be used to examine and ascertain haemal readings from the wrist. The objective of this thesis is to model a pulse wave and compare the results with the ones found from different sources.

The thesis is in Estonian and contains 37 pages of text, 4 chapters, 17 figures, 1 tables.

Lühendite ja mõistete sõnastik

Brahhiaalarter	Õlavarrearter
Diastol	Südame kodade lõõgastus
Difundeeruma	Difusiooni teel levima, segunema
Erütrotsüüt	Punalible
Interpoleerima	Funktsiooni antud väärtuste alusel tema vahepealseid väärtuseid arvutama
Leukotsüüt	Valgelible
mmHg	Millimeetrit elavhõbeda sammast
Radiaalarter	Kodarluuarter
Süstol	Südame kodade kokkutõmme, sellega algab südameetsükkel
Trombotsüüt	Vereliistak
<i>Tunica externa</i>	Veresoonte väliskest
<i>Tunica intima</i>	Veresoonte keskkest
<i>Tunica media</i>	Veresoonte sisekest
Vasodilatsioon	Veresoonte laienemine
Vasokonstriksioon	Veresoonte ahenemine

Sisukord

1 Sissejuhatus	10
2 Veri.....	11
2.1 Vererakud	11
2.2 Vereringe.....	12
2.2.1 Südamsükkel	14
2.3 Verevoolu kiirus.....	16
3 Veresooned.....	18
3.1 Suure vereringe arterid	19
3.1.1 Radiaalarter	20
3.2 Kapillaarid	21
3.3 Veenid	21
4 Vererõhk.....	22
4.1 Rõhk arterites	22
4.2 Vererõhk kapillaaris	24
4.3 Vererõhk veenis.....	25
5 Arvutimudel	26
5.1 Rõhulaine fikseeritud mudel	26
5.2 Rõhust tulenev arterite laienemine	30
5.3 Dünaamilise mudeli visualiseerimine	31
6 Kokkuvõte	35
Kasutatud kirjandus.....	36
Lisa 1 – Rõhulaine mudeli Matlab'i kood.....	38
Lisa 2 – Rõhust tulenev arteri laienemine	39
Lisa 3 – Dünaamilise mudeli visualiseerimise Matlab'i kood	41

Jooniste loetelu

Joonis 1. Vererakud. Vasakult paremale: erütrotsüüt, trombotsüüt, leukotsüüt [8].....	11
Joonis 2. Inimese vereringe [14].	13
Joonis 3. Vereringe üldskeem [9, 186].....	14
Joonis 4. Südamsükkel [9, 196].....	15
Joonis 5. Veresoone struktuur [3].	19
Joonis 6. Vererõhu muutumine veresoontes, pulsirõhk [2].....	23
Joonis 7. Riva-Rocci aparaat vererõhu mõõtmiseks [9, 215].....	24
Joonis 8. Aordi rõhulaine [6].....	26
Joonis 9. Kõünarluuarteri rõhulaine [21]	27
Joonis 10. Kodarluuarteri rõhulaine [21]	27
Joonis 11. Peamised arterid [17].	28
Joonis 12. Rõhulaine graafikud erinevatel kaugustel aordist. Kaugused (a) 1cm, (b) 20cm, (c) 45cm, (d) 69cm.	29
Joonis 13. Rõhu muutumine aordist radiaalarterini [11].....	29
Joonis 14. Radiaalarteri laienemine.	30
Joonis 15. Aort kui summutusveen [9, 216].....	31
Joonis 16. Pulsilaine dünaamiline mudel [1].	32
Joonis 17. Pulsilaine kujud ning arterite diameetrid erinevatel kaugustel aordist: (a) ja (d) 1cm, (b) ja (e) 35cm, (c) ja (f) 69cm.	33

Tabelite loetelu

Tabel 1. Radiaalarteri harud [12].	21
--	----

1 Sissejuhatus

Vererõhk ja ka selle mõõtmine kuuluvad pea iga arstil käigu juurde. Aastakümneid on seda tehtud sfügmomanomeetriga ehk lihtsamalt Riva-Rocci aparaadiga küünarvarrelt. Samas on võimalik vererõhku mõõta ka mujalt, näiteks radiaal- ehk kodarluuarterilt. Sealt on mõõtmine palju lihtsam ning mugavam nii patsiendile kui ka arstile. Selleks aga, et mõõdetavaid väärtusi täpsemalt hinnata, peab teadma radiaalarteri dünaamilisi omadusi. Nende uurimisega antud töö praktiline pool tegelebki.

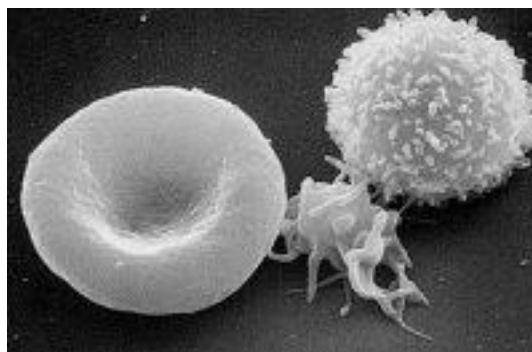
2 Veri

Veri täidab organismis transpordi- ja kaitsefunktsiooni. Verega kantakse kopsudest hapnikku ja seedetraktist imendunud toitained kudedesse. Toitainete oksüdatsioonil kudedes tekkinud süsinikdioksiid ja teised ainevahetuse jäägid viiakse vere vahendusel kopsudesse ja erituselunditesse [10, 46].

Veri koosneb vereplasmast ja verelibledest, mis on suspendeeritud vereplasma; veri on ligikaudu 5 korda viskoossem kui vesi. Vere koguhulgast on vereplasmast 54...59% ja vereliblesid 41...46%, viimast protsendarvu nimetatakse *hematokritiks*. Inimese kehamassist moodustab veri 6...8% [10, 46]. Täiskasvanud naisel on verd 4 ja mehel 5 liitrit, isegi enam [9, 165].

2.1 Vererakud

Põhilise osa vere rakuelementidest moodustavad **punalibled** ehk *erütrotsüüdid*, mida on 1mm^3 umbes 5 miljonit. Samas verehulgas on mehel neid ligikaudu 20% rohkem kui naisel. **Valgeliblesid** ehk *leukotsüüte* on erinevaid, kuid erütrotsüütide arvust moodustavad nad ainult tuhandiku. Väikeseid **vereliistakuid** ehk *trombotsüüte* on erütrotsüütide arvust vaid kümnendik [9, 165].



Joonis 1. Vererakud. Vasakult paremale: erütrotsüüt, trombotsüüt, leukotsüüt [8].

Punalibled ehk *erütrotsüüdid* on väiksemad kui enamik meie keha rakke; nende läbimõõt on 7-8 μ m ja paksus umbes 2 μ m. Rahuolekus on erütrotsüüdid kaksiknõgusad kettad, kuid veresoonte seinte ja teiste rakkude surve muutub nende kuju kergesti. Umbes kolmandiku nende massist moodustab *verevärvnik* ehk *hemoglobiin*, mis annab verele värvuse. Kogu vere hemoglobiinisisaldus on meestel 130-165 g/l, naistel 115-150 g/l [9, 168].

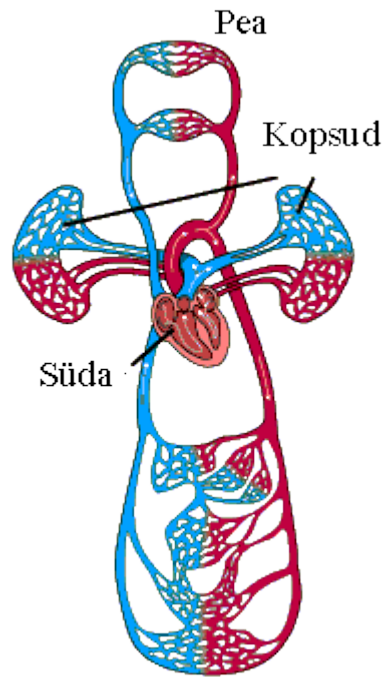
Punalible ringleb ta läbi suure ja väikese vereringe keskmiselt üks kord minutis, s.t kaks korda läbi südame ja kapillaaride. Punalibled transpordivad kopsudest kudedesse hapnikku ja kudedest kopsudesse süsinikdioksiidi. Suur osa hapnikust ja osaliselt süsinikdioksiidist on transportimise ajal hemoglobiiniga seotud [9, 168].

Valgeliblesid ehk *leukotsüüte* on täiskasvanud inimese veres 3000-10000 mm³-s. Nende hulka kuuluvad granulotsüüdid, lümfotsüüdid ja monotsüüdid [9, 173]. Valgeliblesid võib leida ka mujalt kehas kui veres. Neid leidub näiteks põrnas, maksas ja lümfäärmetes. Ühed valgelibledest, lümfotsüüdid, on esmasteks reageerijateks meie immuunsüsteemis. Nad otsivad, tuvastavad ja seonduvad võõraste bakterite, viiruste ja seentega, et need saaks eemaldada. Teised valgelibled, granulotsüüdid ja makrofaagid, tegelevad võõraste rakkude hävitamisega. Need samad valgelibled tegelevad surnud punaliblede eemaldamisega [8].

Vereliistakud ehk *trombotsüüdid* on väikesed kettakujulised tuumata rakud. Nende arv vereringes on väga erinev. Normaalselt on neid 150 000-400 000 mm³-s veres. Nad kleepuvad kergesti üksteise külge ja ümbrusesse, nagu kahjustunud veresoonte seintele ja vereproovi vahendite seintele. Nad osalevad vere hüübimises [9, 176].

2.2 Vereringe

Vereringe ehk tsirkulatsioon on organismi transpordisüsteem. See tagab kudede toitainetega varustamise ja jääkainete eemaldamise. Lisaks sellele transpordib veri keemilisi signaalaineid ehk hormone ning ühtlustab kehaosade vahelist temperatuuri, happelisuse jt erinevusi [9, 185].



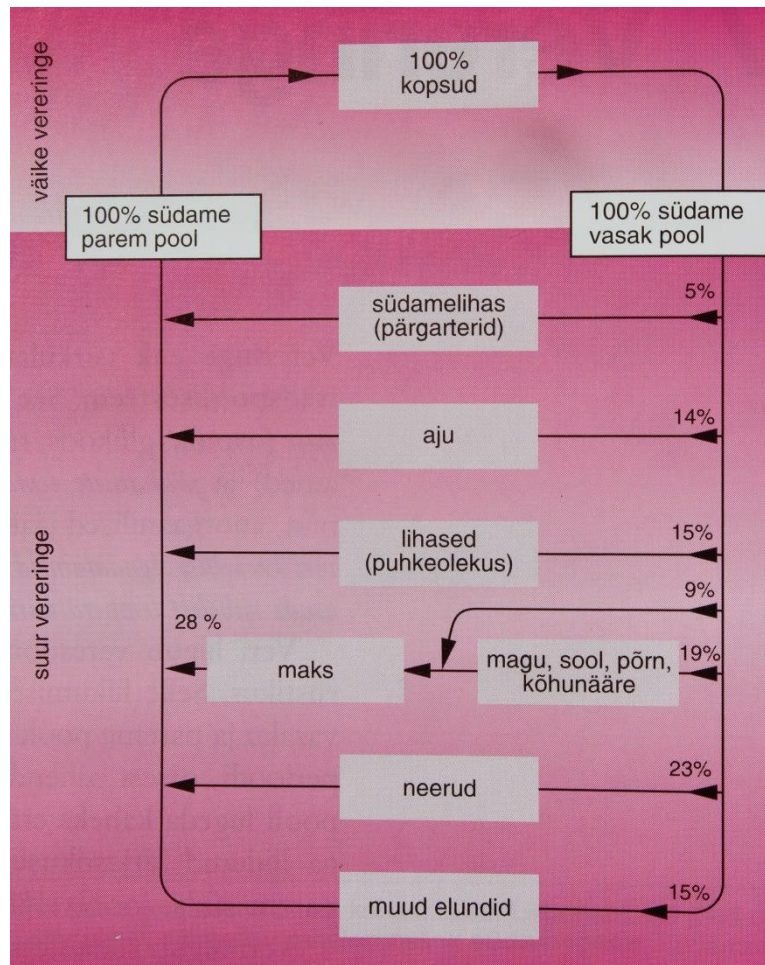
Joonis 2. Inimese vereringe [14].

Inimese vereringe jaguneb suureks ja väikeseks vereringeks. **Suur ehk kehavereringe** saab alguse südame vasaku vatsakese kokkutõmbega, mille tulemusena paisatakse hapnikurikas veri aorti. Sealt liigub veri arterite ja arterioolide kaudu kõigi kudede seotud kapillaaride võrgustikku, kus toimub hapniku loovutamine läbi kapillaaride seinte kudedele ning süsihappegaasi, kusihaape ja teiste ainevahetusjääkide vastuvõtmine. Jääkaineterikas (venoosne) veri liigub kapillaaride venoossest osast peenikestesse veenulitesse, mis lähevad üle veenideks. Need omakorda ühinevad ülemiseks ja alumiseks õõnesveeniks, mis suubuvad südame paremasse kotta [14].

Väike ehk kopsuvereringe algab südame parema vatsakese kokkutõmbumisega, mille käigus surutakse süsihappegaasirikas veri kopsuarteritesse. Nende kaudu jõuab veri kopsudesse, mille sombukeste kapillaarides annab see ära süsihappegaasi ja küllastub hapnikuga. Hapnikurikas (arteriaalne) veri tuuakse südame vasakusse kotta kopsuveenide kaudu [14].

Vere liikumine toimub südame töö tulemusena tekkiva rõhkude erinevuse tõttu veresoonestiku eri osades. Keskmiselt kulub verel puhkeolekus üheks täisringiks 21 – 23

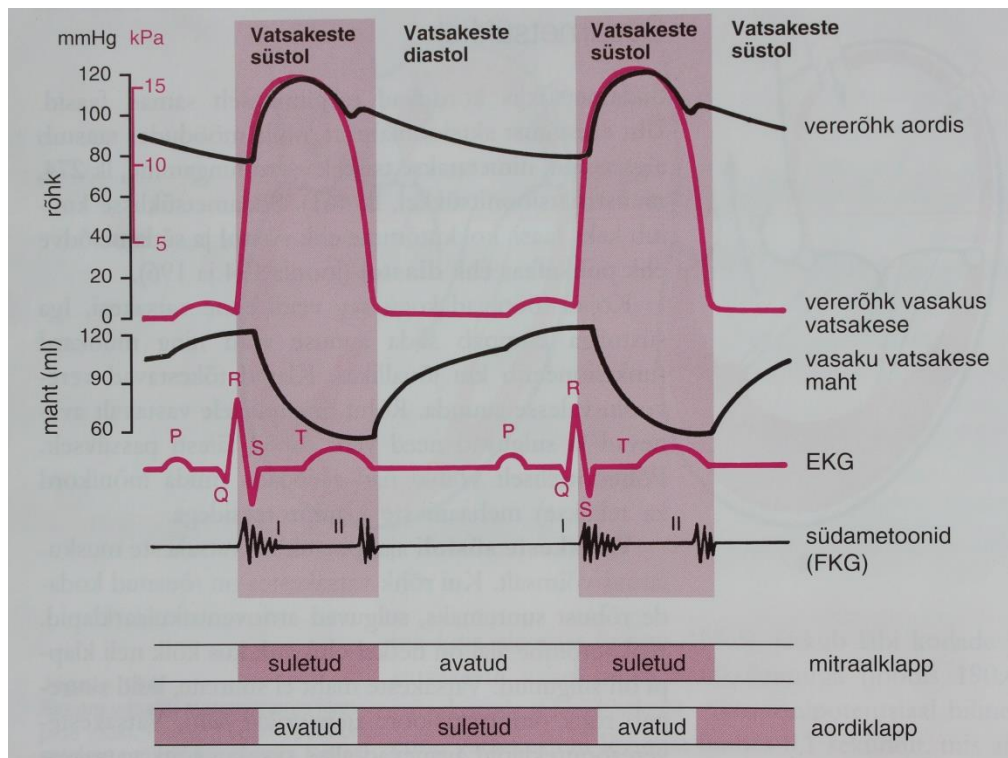
sekundit. Ringluses ei ole korruga kogu veri: kuni 50 % sellest võib olla reservis depoodes: maksas, põrnas, nahaalustes kudedes, kust see vajadusel vereringesse suunatakse [14].



Joonis 3. Vereringe üldskeem [9, 186].

2.2.1 Südamsükkel

Südamsükklis korduvad reeglipäraselt samad faasid. Üht seesugust aktsiooniahelat, mille möödudes taastub algseisund, nimetatakse tsüklikks. Südamsükklisse kuulub kaks faasi: kokkutõmme ehk **süstol** ja südamelõdve ehk puhkefaas ehk **diastol** [9, 195].



Joonis 4. Südametsükkel [9, 196].

Kojad töötavad kogu aeg veidi enne vatsakesi. Iga süstoliga pumpab süda annuse verd ning müokard funktsioneerib kui jõuallikas. Klappid tõkestavad verevoolu valesse suunda. Rõhu tingimustele vastavalt avanevad ja sulguvad need vere survele täiesti passiivselt [9, 195].

Südametsükkel algab kodade kokkutõmbe ehk süstoliga (0,1 sekundit). Selle käigus paisatakse lõõgastuse ehk diastoli käigus pooleldi verrega täitunud vatsakestesse täiendav kogus verd (lõpuks on seda kummaski vatsakeses umbes 150 ml). Sellele järgneb kodade diastol ehk lõõgastumine (0,7 sek). Kodade süstoli järel toimub vatsakeste süstol. Selle esimese 0,05 sekundi jooksul leiab aset kodade-vatsakeste vaheliste klappide sulgumine, seejärel 0,05 sek vältel kokkutõmbuvais vatsakestes rõhu tõus, mistõttu avanevad aordi ja kopsuarteri poolkuuklapid ning järgneva 0,25 sek jooksul paisatakse vatsakeste jätkuva kokkutõmbe tagajärjel veri aorti (vasakust vatsakesest) ja kopsuarterisse (paremast vatsakesest) [15].

Vatsakeste kokkutõmbele järgneb lõõgastumine, mille tõttu nende siserõhk langeb ja poolkuuklapid sulguvad, tõkestades väljapumbatud vere tagasivoolamise. Hõlmiste

klappide avanedes algab vatsakeste verrega täitumine. Kõik see kestab kokku kuni 0,7 sekundit [15].

Diastoli lõpus on seega mõlema vatsakese maht umbes 150 ml [15]. Ühe südamelöögi mahtu nimetatakse **löögimahuks**. Ligi pool verest surutakse välja juba süstoli esimese kolmandiku jooksul ning vatsakeste süstoli viimase neljandiku ajal ei väljutata verd peaaegu üldse. Vatsakestesse jääb seega peale süstolit 50-60 ml verd. Tugeval koormusel võib see jääkmaht väheneda isegi 10-30 ml-ni [9, 197].

Täiskasvanud inimesel on südame löögisagedus puhkeolekus 60-80 korda minutis. Südame **minutimahu** all mõistetakse ühe südamepoole kaudu minutis kulgeva vere hulka (löögimaht x löögisagedus = minutimahu), mis täiskasvanud inimesel on puhkeolekus umbes 5 liitrit [9, 297].

2.3 Verevoolu kiirus

Verevoolu kiirus on südame tsüklilise töö tõttu südamelähedastes arterites pulseeriv – süstolis kiirem, diastolis aeglasem. Südame vasaku vatsakese süstoli ajal saavutab vereosakeste liikumise kiirus aordis maksimumi, ulatusel 30...50cm/s. Arterite hargnemisel väiksemateks veresoonteks suureneb nende summaarne ristlõikepindala. Võrdeliselt sellega väheneb vere voolamise kiirus. Kapillaarides, kus vere liikumise kiirus on ainult mõni millimeeter sekundis, on parimad võimalused ainete vahetuseks vere ja kudede vahel. Veenides, mille summaarne ristlõikepindala väheneb, kasvab vere voolamiskiirus ja saavutab südamelähedastes õõnesveenides 23...30cm/s [10, 55].

Verevoolu hulka erinevates arteri punktides on võimalik leida ühe arvutuse teel. Selleks ongi vaja teada verevoolu kiirust ning veresoone raadiust, et arvutada veresoone läbilõike pindala. Selle aluseks on võetud vedelike voolu hulga arvutamise valem (1) [20]:

$$Q = v * A = \text{voolukiirus} * \text{läbilõike pindala} \quad (1)$$

$$\text{Vere vooluhulk} = \text{voolukiirus} * \text{läbilõike pindala} = \text{vere voolukiirus} * (\pi * (\text{veresoone raadius}^2)) \quad (2)$$

Valemis (2) on vere vooluhulga arvutamiseks kasutusele võetud üldvalemis tehtud täpsustused, mis komponenti on vaja vere vooluhulga arvutamiseks.

Näiteks võtame radiaalarteri raadiuseks ühes punktis 1.7mm [13], verevoolu kiiruseks 0,4m/s ehk 40cm/s. Asendame arvud valemisse ja saame:

$$Vooluhulk = 40 * (\pi * 0,17^2) = 3,632 \text{ cm}^3/\text{s} = 0,003632 \text{ l/s} = 0,218 \text{ l/min}$$

Võrdluseks võtame ühe punkti küünarluuarteris, kus on selle raadiuseks 3mm [13]. Samal voolukiirusel saame tulemuseks:

$$Vooluhulk = 40 * (\pi * 0,3^2) = 11,31 \text{ cm}^3/\text{s} = 0,01131 \text{ l/s} = 0,6786 \text{ l/min.}$$

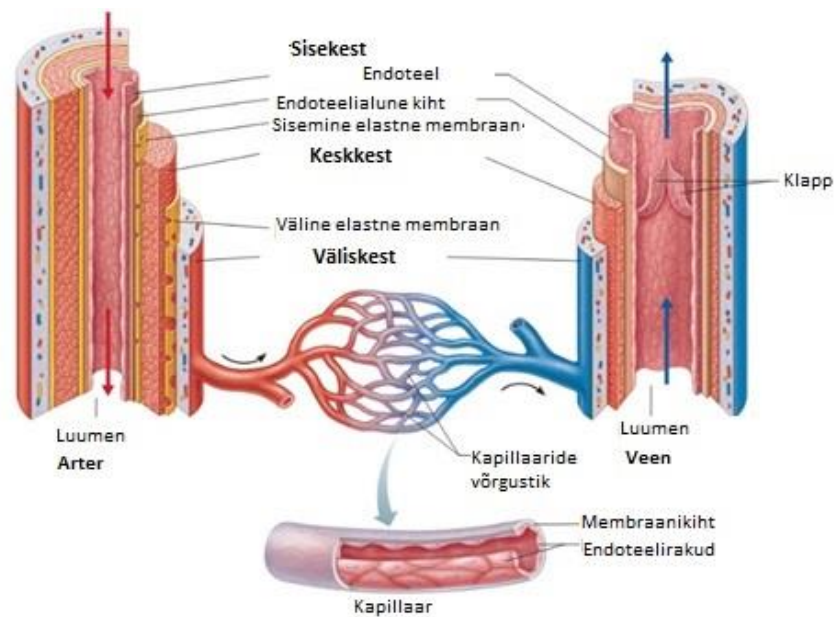
Sellest valemist ja näideteks toodud arvutustest tuleneb lihtne järeldus: mida suurem on veresoone läbilõike pindala, seda suurem on seda läbiva vere hulk ühes ajaühikus.

3 Veresooned

Veresooned on torujad elundid, mida mööda veri ringleb. Veresoonte süsteemi kuuluvad arterid (tuiksooned), arterioolid (peenimad arterid), kapillaarid, veenulid (peenimad veenid) ja veenid (tõmbsooned). Südamest kudede poole suunduvad veresooned on arterid, südamesse suunduvad on veenid. Veenide arv ja maht on arterite omast umbes 2 korda suurem. Arterioole ja veenuleid ühendab tihe kapillaaride võrgustik [7, 343].

Kõigi veresoonte ja ka südame sisekesta sisemise kiht on lameepiteelist moodustunud õhuke endoteel. Kapillaarides pole muid kihte, kui mitte arvestada sidekoelist basaalmembraani. Erinevad ained liiguvadki verest kudedesse ja vastupidi läbi kapillaarseinte [9, 202].

Teistes veresoontes moodustub endoteel koos sidekoega *sisekesta* (*tunica intima* ehk *intima*). Sellest väliselt on *keskest* (*tunica media* ehk *media*), milles leidub lihas- ja elastiinkiude. Veresoonte *väliskest* (*tunica externa* ehk *adventitia*) ühendab veresooni ümbritsevate kudede. Suurte veresoonte seinas on omad väikesed *veresooneseinaveresooned*, mis varustavad eeskätt väliskesta. Nad ei pärine varustatavast veresoonest, vaid saavad mujalt alguse [9, 202-203].



Joonis 5. Veresoone struktuur [3].

Arterites on üsna kõrge vererõhk ning nad ongi paksuseinalised. Arterite valendik ehk luumen on väike, seetõttu voolab veri arterites kiiresti. Veenid on õhukeste seintega ja vererõhk on neis madal. Vere voolukiirus on veenides oluliselt aeglasem kui arterites [9, 203].

3.1 Suure vereringe arterid

Südame vasakust vatsakesest saab alguse ainult üks arter: **aort**. Ta suundub esmalt paremale (ülenev aort), pöörduv siis vasakule ja taha lülisamba lähedale (aordikaar) ning kulgeb edasi allapoole (alanev aort). Alaneva aordi rinnaõõnes olevat osa kuni vahelihaseeni nimetatakse *aordi rinnaosaks (pars thoracica aortae)*. Esimesed aordist lähtuvad harud on **vasak** ja **parem koronaararter**, mis algavad peaaegu aordiklapi klapikest [9, 204].

Aordikaarest algab kolm suurt arterit, millest parempoolseim hargneb peaaegu kohe kaheks. Neist neljast veresoonest keskmised (ühisunearterid) viivad verd peapiirkonda ja äärmised transpordivad seda (rangluualused arterid) peamiselt ülajäsemetesse [9, 204].

Ühisunearter (*arteria carotis communis*) hargneb kõri kõrgusel kaheks suureks haruks: sisemiseks ja välimiseks unearteriks. Seal on ka pulss hästi palpeeritav. **Rangluualuse arteri** (*arteria subclavia*) esimene haru on *lüliarter (arteria vertebralis)*, mis suundub läbi

kaelalülide ristijätkemulkude ja suurmulgu kaudu ajju. Vasak ja parem lüliarter ühinevad kolju sees *põimikuarteriks*, mis varustab verega umbes kolmandikku ajukoest [9, 204-205].

Rangluualune arter läheb rangluu alt ning on ümbritsetud närvipõimikuga. Ta jätkub *kaenlaarterina (arteria axillaris)* ning õlavarrel *õlavarrearterina (arteria brachialis)*. Küünarliigese piirkonnas hargneb arter *küünarluuarteriks (arteria ulnaris)* ja *kodarluuarteriks (arteria radialis)*. Viimane kulgeb põidla poolel. Kodarluuarteri pulssi kombeldakse tavaliselt randmest veidi kõrgemal. Küünar- ja kodarluuarterid moodustavad kämbلاميirkonnas kaks ühenduskaart: *pindmise* ja *süva pihukaare*. Neist lähtuvad sõrmearterid [9, 206].

Rinnaaordist lähetuvad **roietevahearterid** kümnesse alumisse roietevahesse. Söögitorra, hingamisteedesse ja kopsudesse suunduvad suhteliselt peened harud. Vahelihasest allpool olevat aordi osa nimetatakse *kõhuaordiks (aorta abdominalis)*, mille harud võib jagada paarituteks ja paarilisteks. Otse vahelihase alt läheb paaritu **kõhuõõnetüvi**. See on lühike arteri osa, mis jaguneb mao-, põrna- ja maksaharudeks. Soolt varustavad verega paaritud kinnistiarterid, millel on palju omavahelisi ühendusharusid. **Ülemine kinnistiarter** läheb kõhuõõnetüve alumisest osast. Ta varustab verega kogu peensoolt ja jämesoole algusosa. **Alumine kinnistiarter** on võrdlemisi peen. Ta varustab ainult jämesoole lõpposa. Kõhuaordi paarituteks harudeks on eelkõige suured **neeruarterid**. Kõhuaordi paariliste harude hulka kuuluvad ka sugunäärmete arterid [9, 206-208].

3.1.1 Radiaalarter

Radiaalarter ehk kodarluuarter on jätkuks õlavarrearterile. Võrreldes küünarluuarteriga on radiaalarteri läbimõõt väiksem. Radiaalarter saab alguse õlavarrearteri kahestumisest, mis asetseb küünaraugu juures ja läheb edasi kodarluu läheduses kuni randmeni. Radiaalarter algab küünraaugust, kulgeb randme välisküljel (pulsi katsumise koht!) ning moodustab peopesas koos küünarluuarteriga (*a. ulnaris*) **süva pihukaare (arcus palmaris profundus)** [22]. Radiaalarter asub seega kolmes osas: käsivarres, randme tagaküljes ja käelabas [16].

Radiaalarteri harud võib jagada kolme rühma vastavalt sellele, millises piirkonnas nad asuvad:

Tabel 1. Radiaalarteri harud [12].

Käsivarres	Randme tagaküljel	Käelabas
<i>Radial recurrent</i>	<i>Dorsal carpal</i>	<i>Princeps pollicis</i>
<i>Palmar carpal</i>	<i>First dorsal metacarpal</i>	<i>Radial indicis</i>
<i>Superficial palmar</i>		<i>Deep palmar arch</i>

3.2 Kapillaarid

Kapillaarid on kõige väiksemad veresooned. Nende sisemine läbimõõt on enam-vähem sama suur kui erütrotsüütide oma, kohati isegi väiksem. Kapillaaride pikkus on umbes 1 mm. Organismis on umbes miljon kapillaari. Kapillaari seina läbimõõt on 0,5 μm . Vere ja koevedelike vaheline ainevahetus toimub osaliselt liitekohtadest rakkude vahelt. Gaasid ja mõned rasvlahustuvad ained difundeeruvad otse läbi rakkude kergesti [9, 218-219].

Ainult 5% vere koguhulgast on alati kapillaarides. Kapillaar on töös ainult ajuti, neid sulgevad silelihasest sulgurid *prekapilaarsfinkterid*. Neid on vahetult enne kapillaare olevates arterioolides, ent kapillaarides neid pole. Sfinkterite tegevust reguleerib osaliselt kudede hapnikusisaldus. Kui hapnikku on vähe, on kapillaarid keskmisest kauem avatud ja neis voolab veri kiiresti [9, 219].

3.3 Veenid

Veenid on õhukese seinaga veresooned, mida mööda läheb veri südamesse. Veenide seintes on silelihasrakke. Nende toonusest ehk *veenitoonusest* sõltub veeni maht ja seal olev vere hulk. Kõige suurem osa verest on veenides. Seega on veenid mahtuvusveresooned. Venosset verevoolu tõhustavad mitmed abitegurid. Rinnaõõne alarõhk abistab venosse vere tagasikulgu eelkõige sissehingamisfaasis. Ka süda toimib nõrga vaakumpumbana. Südamest kõrgemal abistab venosset vereringet ka raskusjõud, kuna veri langeb südame suunas [9, 220].

4 Vererõhk

Vedelikud liiguvad alati suure rõhu alalt väiksema rõhu suunas. Organismi **vererõhk** põhinebki vere liikumisel arterites [9, 213]. Vererõhk on rõhk, mida veri avaldab veresoonte seintele. Vere liikumist tekitab südame vatsakeste kokkutõmme, mis vere arteritesse surub. Vererõhk sõltub erinevatest teguritest:

- südamest aorti paisatava vere hulgast;
- veresoonte õõne suurusest;
- veresoonte elastsusest;
- ringlevast vere hulgast;
- südame töö sagedusest;
- inimese vanusest – vanematel inimestel on vererõhk tavaliselt kõrgem kui noortel;
- jms teguritest [19].

Seda, kui kiiresti pääseb veri arteritest kapillaaridesse, reguleerib vereringe perifeerne takistus. *Vereringe perifeerne takistus* on ühine nimetus kõigile tegureile, mis aeglustavad vere voolu suurtest arteritest. See tuleneb peamiselt vere ja veresoonte seinte vahelisest hõõrdumisest. Eeskätt reguleerib seda veresoonte keskmine läbimõõt: mida peenemad on veresooned, seda suurem on perifeerne takistus. Läbimõõdu vähenemine umbes 16% võrra suurendab takistust kahekordseks [9, 214].

4.1 Rõhk arterites

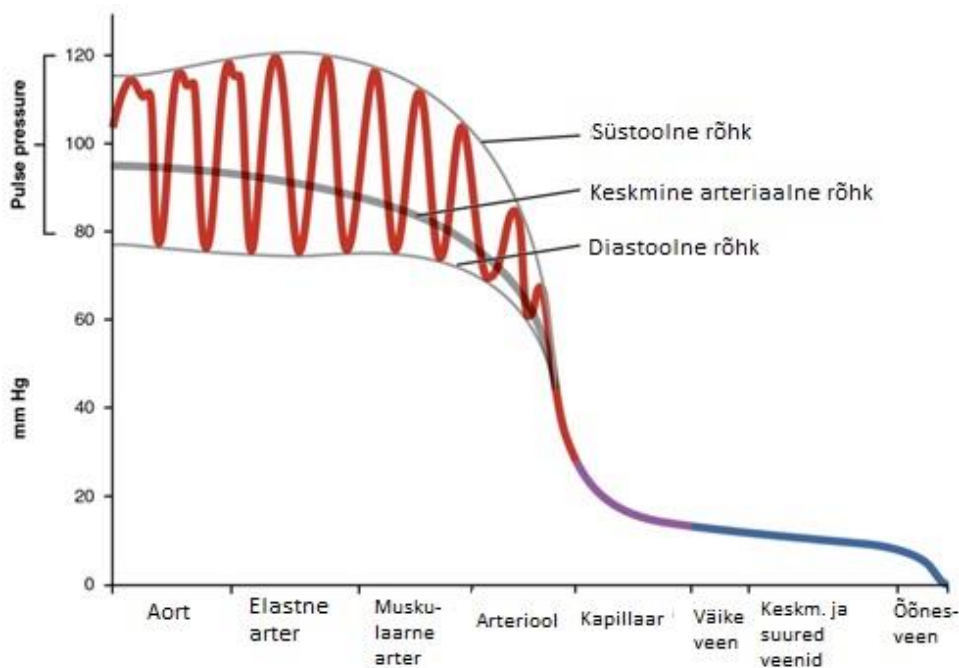
Vererõhu all mõeldakse tavaliselt suurte arterite rõhku, mis on maksimaalne siis, kui vasak vatsake surub süstoli ajal verd suurtesse arteritesse. Noorel tervel inimesel on **süstoolne vererõhk** umbes 120mmHg ehk 16kPa. Rõhuline liigub süstoli ajal mööda artereid ja on mitmel arteril pulsina kombeldav [9, 214].

Diastoli ajal langeb rõhk vasakus vatsakeses nullini. Sulgunud aordiklapi taga alaneb rõhk aeglaselt, sedamööda, kuidas veri liigub peenematesse arteritesse. Suurtes arterites väikseimat vererõhku nimetatakse **diastoolseks vererõhuks**. Noorel tervel inimesel on see puhkeolekus umbes 75mmHg ehk 10kPa [9, 214].

Erinevust süstoolse ja diastoolse rõhu vahel väljendatakse pulsirõhuga. Näiteks inimesel, kellel on süstoolne rõhk 120mmHg ja diastoolne rõhk 80mmHg, on pulsirõhk 40mmHg. Tavaliselt on pulsirõhk umbes 25% süstoolsest rõhust [2].

Mean Arterial Pressure ehk MAP – keskmine arteriaalne rõhk väljendab „keskmist“ rõhku arterites. Seda on keeruline otse mõõta ja keeruline arvutada, kuid keskmist rõhku saab üldiselt arvutada järgmise valemi (3) abil [2]:

$$MAP = diastoolne\ rõhk + \frac{(süstoolne - diastoolne)}{3} \quad (3)$$

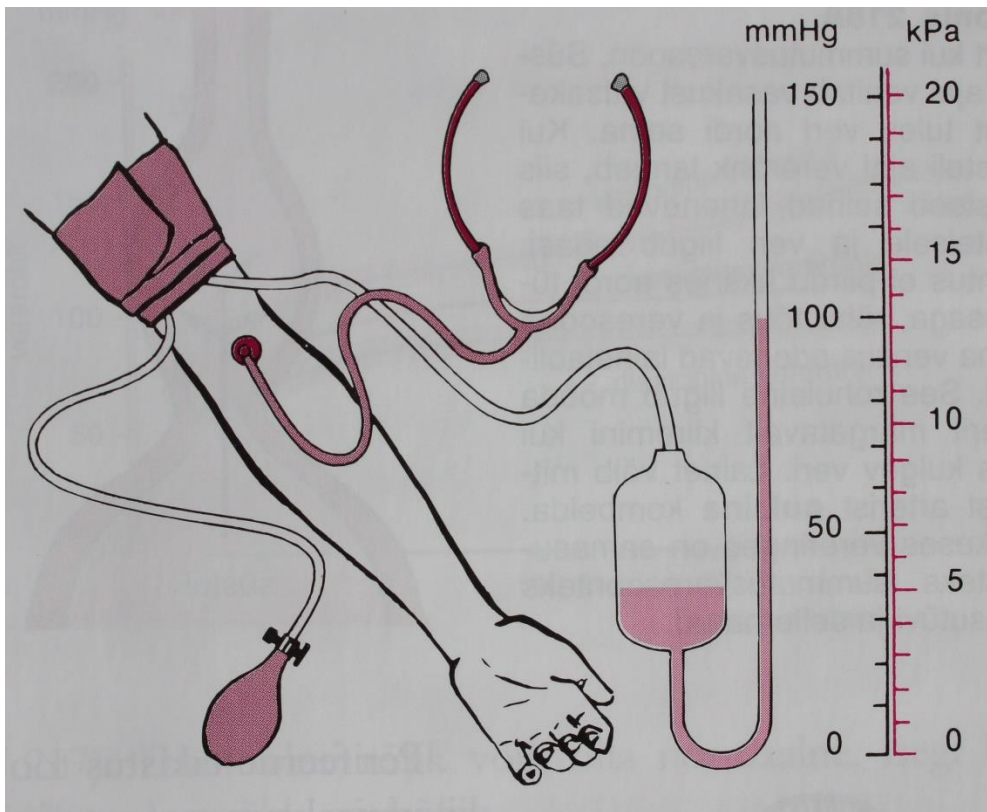


Joonis 6. Vererõhu muutumine veresoontes, pulsirõhk [2].

Perifeerne takistus toob kaasa vererõhu languse vere liikumisel suurtest arteritest väiksematesse, sealt kapillaaridesse ja neist veenidesse. Suurte arterite tekitatav voolutakistus on siiski sedavõrd väike, et neis langeb vererõhk väga vähe. Takistus on väga suur ja rõhu langus märgatav **arterioolides**. Need on lihaselised arterid, mille läbimõõt on

0,02-0,04mm. Eri elundite regulatsioonitegurite toimel muutub arterioolide läbimõõt. Kui mitmete arterioolide läbimõõd väheneb, tõuseb vererõhk suurtes arterites [9, 216].

Arteriaalset vererõhku võib mõõta ka otseselt, veresoonesisese kateetriga. Tavaliselt mõõdetakse seda kaudselt Riva-Rocci aparadi ehk sfügmomanomeetri abil [9, 216].



Joonis 7. Riva-Rocci aparaat vererõhu mõõtmiseks [9, 215].

4.2 Vererõhk kapillaaris

Vererõhk on kapillaari arterioolipoolses otsas umbes 35mmHg (5kPa). Pulsirõhk on kõige enam umbes 7mmHg (1kPa), kuna see on arterioolides ühtlustunud. Kapillaari veenipoolses otsas on rõhk umbes 15mmHg (2kPa) ning pulsirõhku enam pole. Veri liigub kapillaarides nende otste vahelise rõhu erinevuste tõttu (35-15mmHg) [9, 219].

4.3 Vererõhk veenis

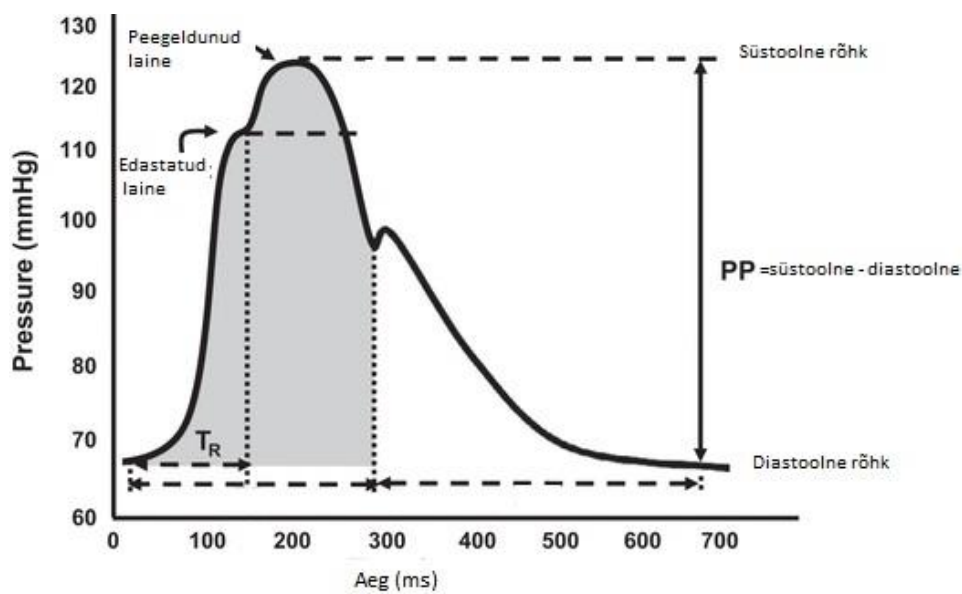
Veenirõhku mõõdetakse tavaliselt otseselt. Andur ühendatakse nõelaga näiteks ühe pindmise küünarvarre veeniga. Tsentraalse veenirõhu mõõtmiseks tuleb kateeder viia rinnaõõne suurtesse veenidesse. Tsentraalne veenirõhk on tavaliselt väga madal (alla 10mmHg). See tõuseb, kui süda ei jõua verd täielikult edasi pumbata [9, 221].

5 Arvutimudel

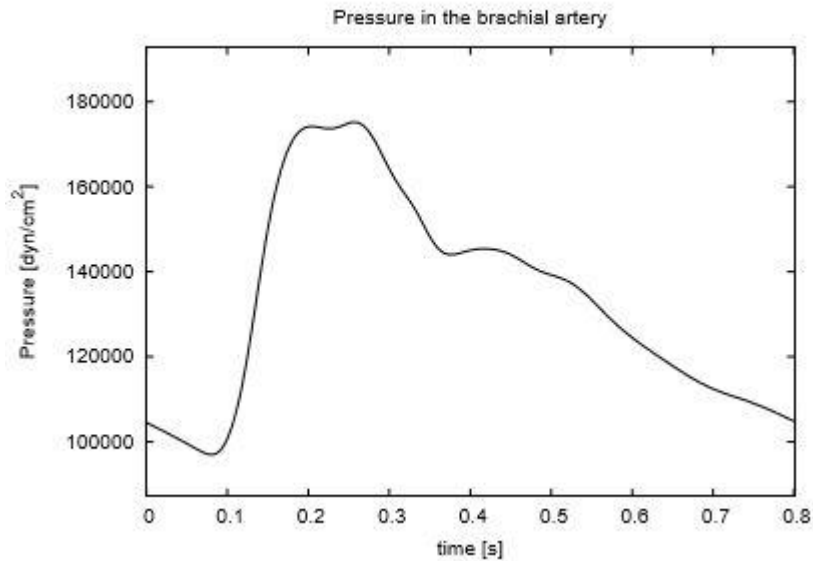
Antud peatükis kirjeldan ja analüüsin töö käigus loodud arvutimudeliga loodud graafikuid ning kirjeldan saadud tulemeid.

5.1 Rõhulaine fikseeritud mudel

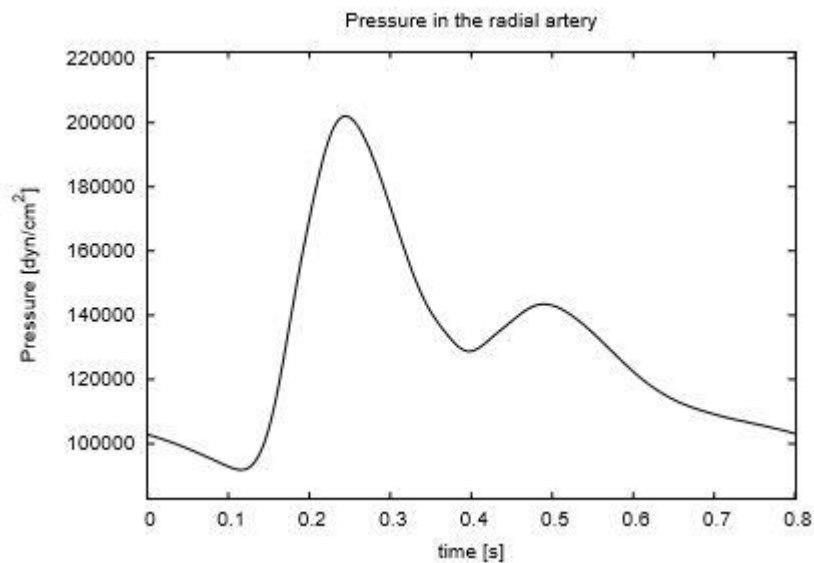
Esmalt lõin Matlab'is rõhulaine mudeli. Selle tegin alates aordist kuni radiaal- ehk kodarluuarteri lõpuni. Rõhulaine mudeli loomisel aluseks võetud graafikud on toodud järgmistel joonisel.



Joonis 8. Aordi rõhulaine [6]



Joonis 9. Küünarluuarteri rõhulaine [21]

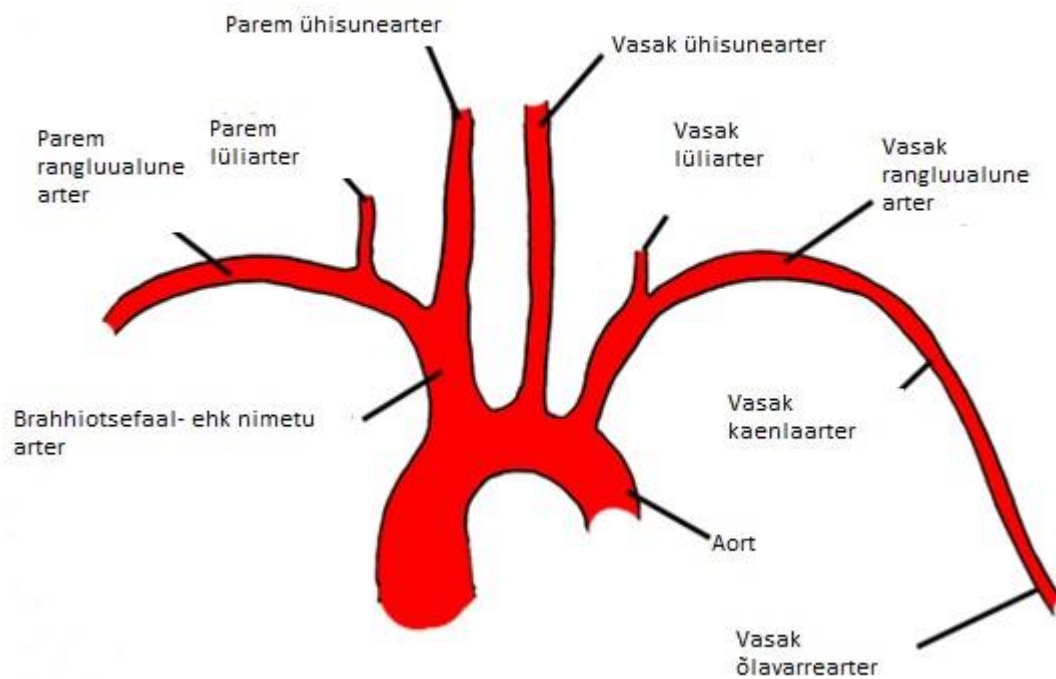


Joonis 10. Kodarluuarteri rõhulaine [21]

Joonistel 9 ja 10 toodud graafikutel on rõhuühikuks märgitud dyn/cm^2 . Et neid saada sama mõõtühikuga nagu aordi rõhugraafik ehk mmHg 's, kasutasin järgmist teisendust:

$$1 \text{ dyn/cm}^2 = 0.0007500637554192 \text{ mmHg} [18].$$

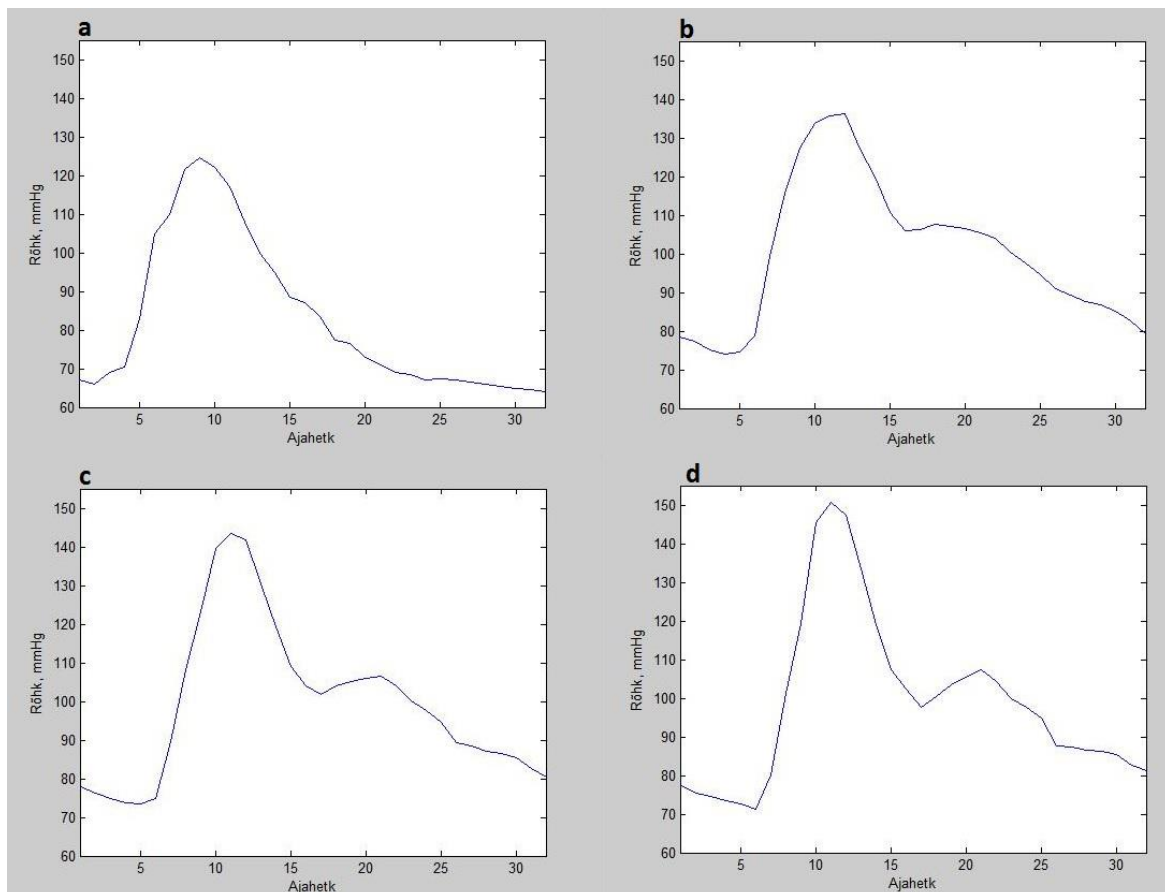
Matlabis on loodud mudel kasutades interpoleerimist. See tähendab, et leides rõhu muutumist õlaluarterist kodarluuarterini võtsin kaks punkti, mille vahele jäänud väärtused leiti interpoleerimise teel.



Joonis 11. Peamised arterid [17].

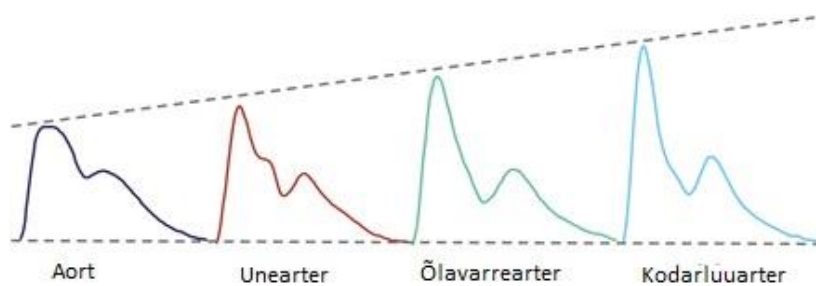
Antud joonisel on näha peamised veresooned, mis lähtuvad südamest. Selle joonise järgi võtsin oma simulatsiooni rangluualuse arteri (*subclavian artery*), aksillaar- ehk kaenlaarteri (*axillary artery*), õlaluuarteri (*brachial artery*) ning sellele järgneva radiaalarteri (*radial artery*).

Simulatsiooni loomiseks võtsin arterite pikkused [13] ja kogu simuleeritava osa pikkuseks tuli kokku 69cm. Antud punktis loodud Matlab'i kood on toodud Lisas 1.



Joonis 12. Rõhulaine graafikud erinevatel kaugustel aordist. Kaugused (a) 1cm, (b) 20cm, (c) 45cm, (d) 69cm.

Nagu jooniselt näha, muutub rõhulaine alates aordist. Mida kaugemale aordist jõuame, seda kõrgem on süstoolse rõhu tipp.



Joonis 13. Rõhu muutumine aordist radiaalarterini [11].

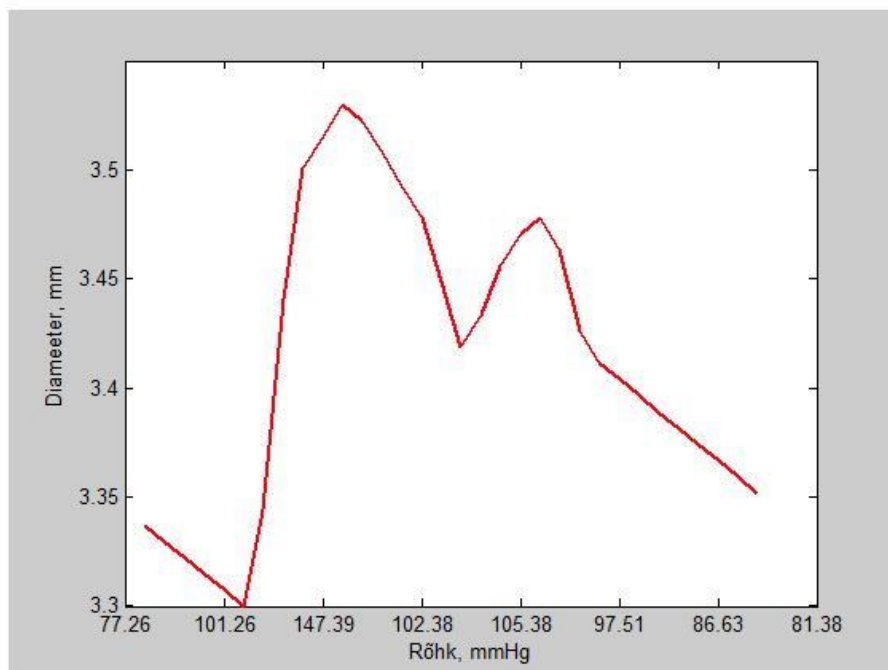
Nagu on näha ka jooniselt 13, muutub süstoolse rõhu tipp kõrgemaks, mida kaugemale aordist jõuame. Võrreldes enda saadud tulemusi sellel joonisel toodud graafikuga saan öelda, et minu loodud simulatsioon vastab tegelikele väärtustele.

5.2 Rõhust tulenev arterite laienemine

Peale seda, kui veri on südamest välja saadetud, aitavad arterites olevad elastsed koed säilitada kõrget rõhku sel ajal, kui nad laienevad, et verd läbi lasta ja siis taastuvad. See laienemine ja taastumine ongi tuntav pulsina, mida annab kombelda nii manuaalselt kui ka elektrooniliselt mõõta. Ehkki mida kaugemal südamest, seda enam väheneb laienemise ja taastumise efekt, on siiski süstoolsed ja diastoolsed komponendid äratuntavad [2]. Seega, mida kõrgem on vererõhk, seda laiem on veresoone.

Pulsilaine käigus kasvab arteri läbimõõt, kuna rõhk seal ka kasvab. Radiaal- ehk kodarluuarteri keskmine luumeni läbimõõt on 3.3mm [13]. Rõhu kasvades laieneb ka kodarluuarteri läbimõõt. Simulatsiooni käigus arvestan, et läbimõõt muutub 10% ulatuses. Matlab'is loodud kood on toodud Lisas 2.

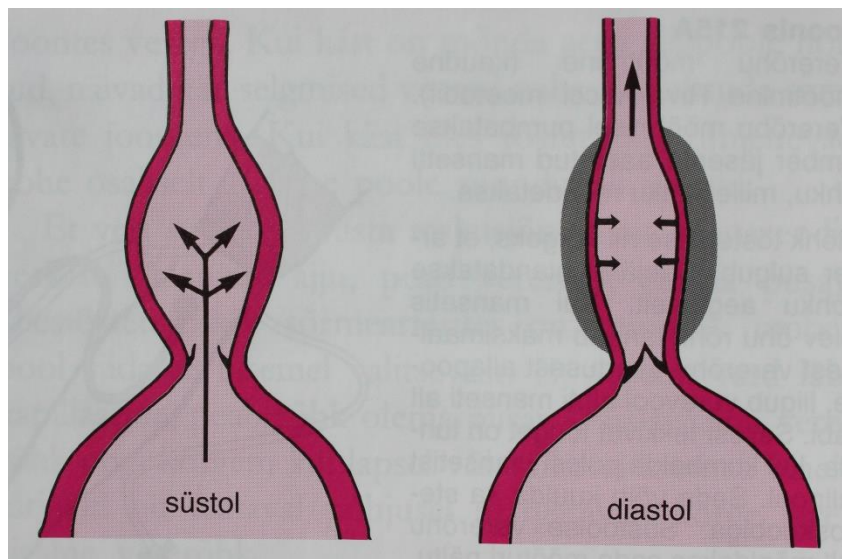
Mudeli loomisel lähtusin kodarluuarteri läbimõõdust 3.3mm, mille panin muutuma kuni 3.53mm'ni. Seda tegin interpoleerimise teel, selles vahemikus võtsin arvestusse 32 punkti. Seejärel seadsin läbimõõdud vastavaks rõhkudele, mis olid leitud punktis 5.1 ning kujutasin saadud tulemust joonisel 14.



Joonis 14. Radiaalarteri laienemine.

Nagu joonisel toodud graafikult on näha, kasvab arteri läbimõõt rõhu kasvades, rõhu vähenedes muutub arteri läbimõõt taas väiksemaks.

Rõhk ei ole siiski ainus faktor, mis muudab arteri läbimõõtu. Seda mõjutavad veel ka vasodilatsioon ehk veresoonte laienemine ning vasokonstriksioon ehk veresoonte ahenemine, neid kontrollib silelihaste töö. Näiteks tehes trenni kasvab verevool skeletilihastesse vasodilatsiooni tõttu, samal ajal kui verevool seedesüsteemi väheneb vasokonstriksiooni tõttu [4]. Vasokonstriksioon ja vasodilatsioon esinevad ka kodarluuarteris. Kodarluuarter kuulub muskulaarsete arterite hulka, mis kannavad verd elastsetest arteritest edasi väiksematesse arteritesse ja arterioolidesse [5].

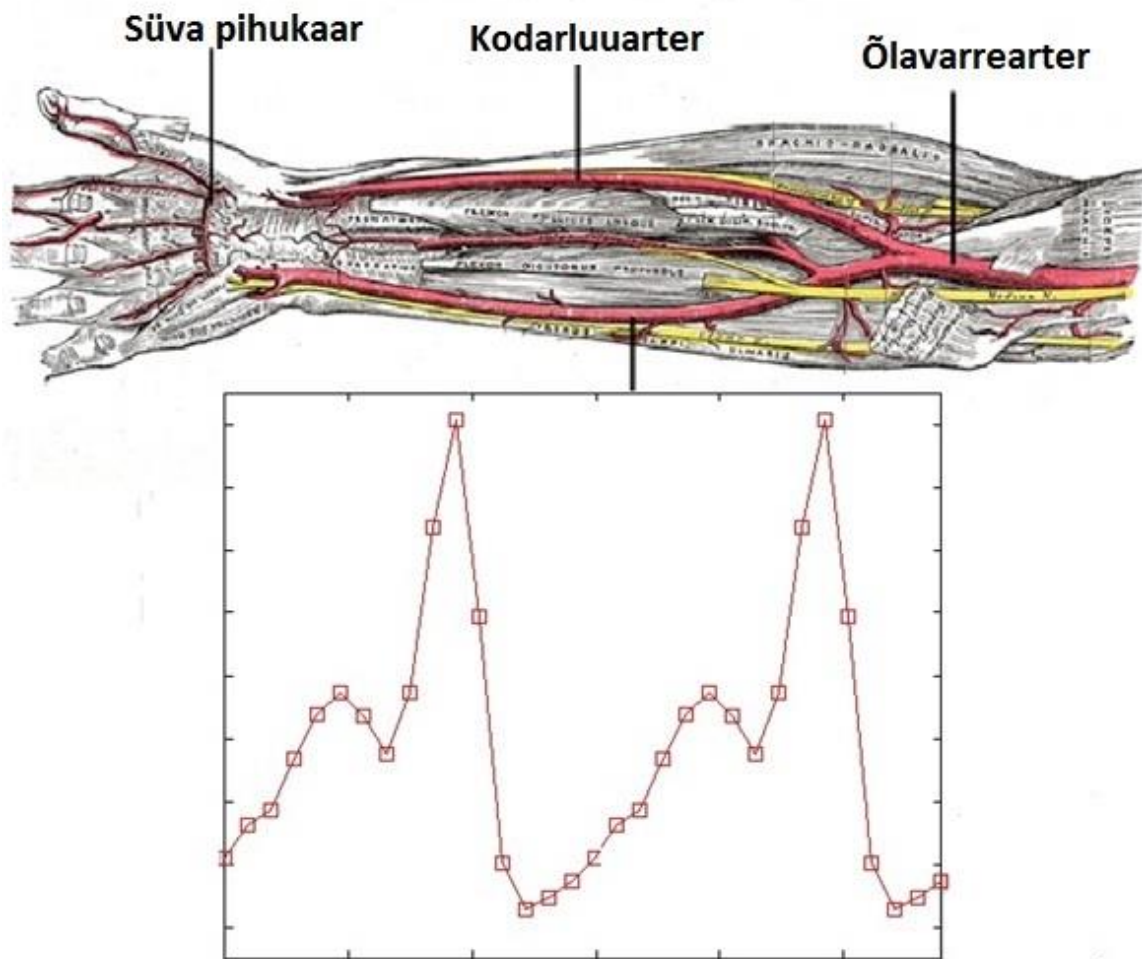


Joonis 15. Aort kui summutusveen [9, 216].

Joonisel 15 on näha, kuidas aort töötab kui summutusveen. Süstoli ajal venitab vasakust vatsakesest tulev veri aordi seinu. Kui diastoli ajal vererõhk langeb, siis elastsed seinad lähenevad teineteisele ja veri liigub edasi [9, 216].

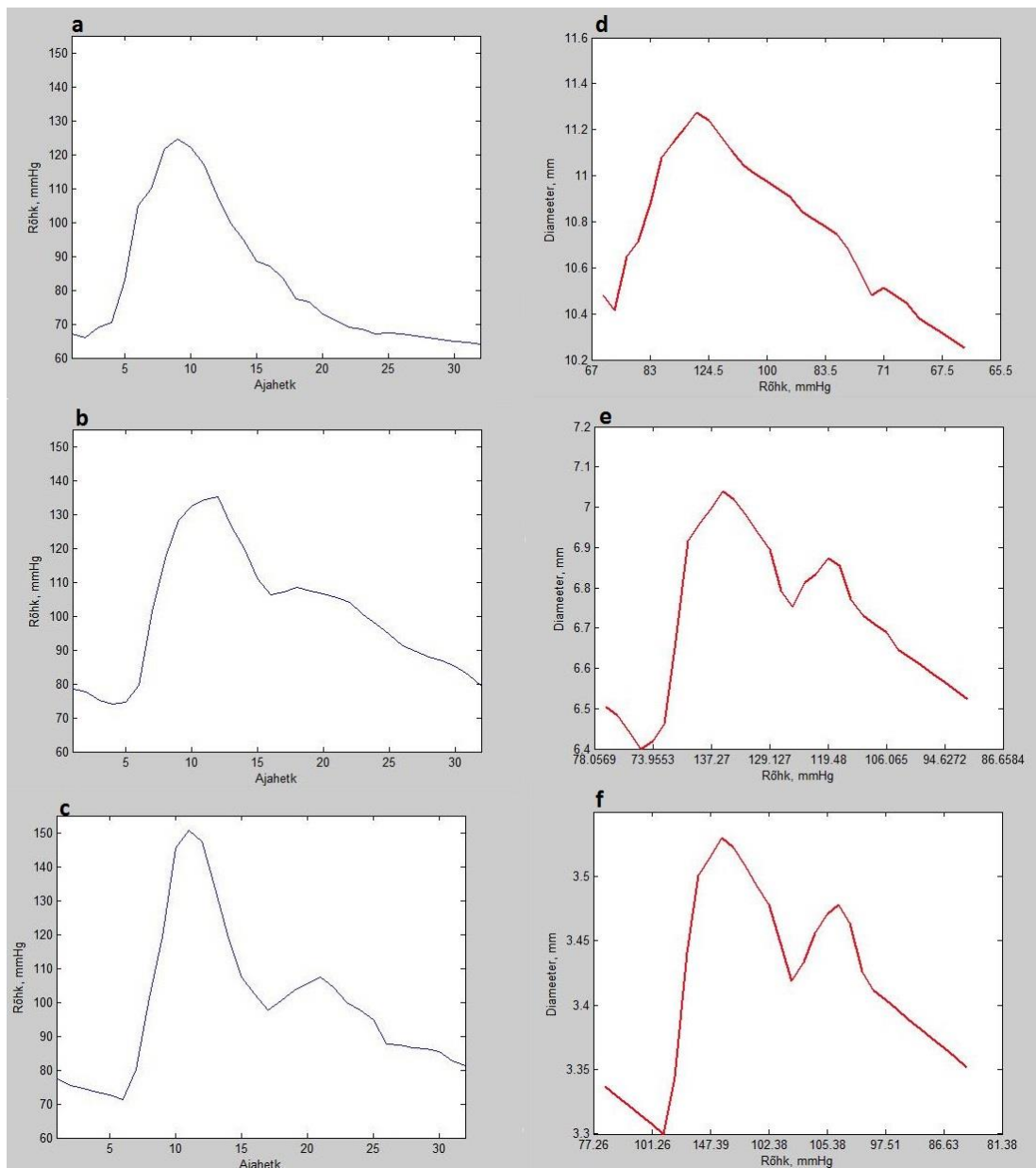
5.3 Dünaamilise mudeli visualiseerimine

Antud punktis simuleerisin pulsilainet radiaalarteris. Saadud joonise kõrvutan käe mudeliga, et näha, kuidas pulsilaine liigub. Antud punkti jaoks loodud Matlab'i kood on toodud Lisas 3.



Joonis 16. Pulsilaine dünaamiline mudel [1].

Antud joonis annab ettekujutuse, kuidas pulsilaine kodarluuarteris liigub. Selle järgi saab ka hinnata arteri dünaamilisi omadusi ning nende muutumist.



Joonis 17. Pulsilaine kujud ning arterite diameetrid erinevatel kaugustel aordist: (a) ja (d) 1cm, (b) ja (e) 35cm, (c) ja (f) 69cm.

Joonisel 17 on toodud pulsilaine kujud(a-c) ning arterite diameetri muutumine sõltuvalt rõhust(d-f). Graafikud on toodud erinevatel kaugustel aordist: 1cm, 35cm ja 69cm kaugusel. Nende graafikute loomiseks kasutatud kood on toodud Lisas 2.

Arterite diameetri laienemiseks arvestasin 10% vahemikku. Seega muutub kodarluuarter vahemikus 3.3...3.53mm, küünarluuarter 6.4...7.04mm ning kaenlaarter 10.25...11.275mm. Nagu ka punktis 5.2, leidsin arterite diameetrite muutused interpoleerimise teel, taas

kasutasin 32 punkti. Seejärel seadsin interpoleeritud väärtused vastavaks rõhkudele kindlatel kaugustel alates aordist(1cm, 35cm ja 69cm) ning kujutasin tulemust graafikul.

Joonisel 17 toodud graafikuid võrreldes on näha, kuidas pulsilaine kuju muutub. Mida kaugemal me aordist oleme, seda kõrgem on süstoli tipp. See on seetõttu, kuna võrreldes aorti ja kodarluuarterit, on kodarluuarteri diameeter väiksem, seega ka rõhk on suurem. Tagasipeegeldunud pulsilaine osa tõstab süstoli tipurõhku. Mida kaugemale me aordist jõuame, seda hiljem jõuab ka peegeldunud pulsilaine kohale.

Pulsilaine peegeldumist tekitab ka veresoonte kahestumine. Pulsilaine liigub mööda veresooni edasi, kuid kahestumise punktist peegeldub tagasi ja avaldab mõju pulsilaine põhikujule. Aordi juures on pulsilaine maksimaalne väärtus madalam, kuna kahestumisi on vähem, kui radiaalarteri puhul. Sellest tulenevalt on ka radiaalarteri pulsilaine maksimaalne väärtus kõrgem.

6 Kokkuvõte

Käesolevas töös uuriti esmalt vere ja veresoonte kohta olemasolevaid allikaid ning töö teises pooles loodi radiaalarteri pulsiline arvutimudel. Mudeli loomisel lähtuti kirjanduses leitud andmetest.

Töö oodatavaks tulemuseks oli arvutimudel, mis on kontrollitud võrdlusega, mille toimimine on võrreldav kirjandusest leitavaga. Võrreldes loodud mudeli tulemusi kirjandusest leitud tulemustega, on näha samasust mudeliga loodud graafikute ning nende aluseks võetud graafikutega kirjandusest. Mudeliga loodud graafik ei ole nii ühtlane, kui kirjandusest leitav, kuna mudeli loomisel on kasutatud lineaarset interpoleerimist. Siiski ühtivad loodud graafikute kujud teoreetiliste piltidega, mida on näha ka punktis 5.1 välja toodud graafikute põhjal. See kinnitab loodud mudeli õigsust.

Käesolevat tööd saab edasi arendada. Loodud mudelit saaks veelgi konkreetsemaks muuta, et annaks täpsemaid tulemusi. Pulsilainet saaks veelgi täpsemaks muuta, kui mudelisse lisada rohkem hetki, millal väärtusi arvestada. Sama kehtib ka rõhust tuleneva arteri laienemise mudeli kohta. Siiski on töösse võetud piisavalt ajahetki, et võrreldes saadud tulemusi kontrolliks kirjandusest leitavatega, on näha, et loodud mudel on piisavalt täpne.

Kasutatud kirjandus

- [1] Arteries of the upper limb. [WWW] <http://teachmeanatomy.info/upper-limb/vessels/arteries/> (20.05.2016)
- [2] Blood Flow, Blood Pressure and Resistance. [WWW] <http://cnx.org/contents/A4QcTJ6a@3/Blood-Flow-Blood-Pressure-and-> (22.05.2016)
- [3] Blood vessels. [WWW] <http://antranik.org/blood-vessels/> (01.05.2016)
- [4] Blood Flow Through the Body. [WWW] <https://www.boundless.com/biology/textbooks/boundless-biology-textbook/the-circulatory-system-40/blood-flow-and-blood-pressure-regulation-227/blood-flow-through-the-body-854-12099/> (25.05.2016)
- [5] Distributing artery. [WWW] https://en.wikipedia.org/wiki/Distributing_artery (27.05.2016)
- [6] Donley, D.A., Fournier, S.B, Reger, B.L, DeVallance, E., Bonner, D.E, Olfert, I.M, Frisbee, J.C, Chantler, P.D. Aerobic exercise training reduces arterial stiffness in metabolic syndrome. – *Journal of Applied Physiology*, 2014, Vol. 116 no. 11, 1396-1404. [Online] <http://jap.physiology.org/content/116/11/1396> (20.05.2016)
- [7] EE 10. TÜRI-Y. Tallinn: Eesti Entsüklopeediakirjastus, 1998.
- [8] Human blood: Blood components. [WWW] http://anthro.palomar.edu/blood/blood_components.htm (01.05.2016)
- [9] Inimese füsioloogia ja anatoomia / Nienstedt, W., Hänninen, O., Arstila, A., Björkqvist, S.-E., WSOY. Tallinn: Medicina, 2007.
- [10] Jänes, H. Tervise teejuht. I köide. Tallinn: Valgus, 1988.
- [11] McEniery, C.M., Cockcroft, J.R., Roman, M.J, Franklin, S.S., Wilkinson, I.B. Central blood pressure: current evidence and clinical importance. – *European Heart Journal*, 2014, vol. 35, issue 26, 1719-1725. [Online] <http://eurheartj.oxfordjournals.org/content/35/26/1719> (20.05.2016)
- [12] Radial artery. [WWW] <http://www.mananatomy.com/body-systems/cardiovascular-system/radial-artery> (22.05.2016)
- [13] Reymond, P., Merenda, F., Perren, F., Rüfenacht, D., Stergiopoulos, N. Validation of a one-dimensional model of the systemic arterial tree. – *AJP – Heart and Circulatory Physiology*, 2009, vol. 297, 208-222. [Online] <http://ajpheart.physiology.org/content/297/1/H208>
- [14] Ringeelundkond. Veresooned. Vereringe. [WWW] <http://lepo.it.da.ut.ee/~jaanusu/vereringe.htm> (11.05.2016)
- [15] Ringeelundkond. Süda. [WWW] <http://lepo.it.da.ut.ee/~jaanusu/syda.html> (11.05.2016)
- [16] The Arteries. 4b. 3. The Radial Artery. [WWW] <http://www.bartleby.com/107/151.html> (20.05.2016)
- [17] The Circulatory System. [WWW] <http://inside.ucumberlands.edu/academics/biology/faculty/kuss//courses/CirculatorySystem/MajorSystemicVessels.htm> (19.05.2016)

- [18] Unit Converter. [WWW] [http://www.translatorscafe.com/cafe/EN/units-converter/pressure/25-42/dyne%2Fcentimeter%C2%B2-millimeter_mercury_\(0%C2%B0C\)/](http://www.translatorscafe.com/cafe/EN/units-converter/pressure/25-42/dyne%2Fcentimeter%C2%B2-millimeter_mercury_(0%C2%B0C)/) (11.05.2016)
- [19] Vereringeelundkond – Inimese elundkonnad. [WWW] <http://elundkonnad.weebly.com/vereringeelundkond.html> (22.05.2016)
- [20] Volumetric flow rate. [WWW] https://en.wikipedia.org/wiki/Volumetric_flow_rate (27.05.2016)
- [21] Watanabe, S.M, Blanco, P.J, Feijóo, R.A. Mathematical Model of Blood Flow in an Anatomically Detailed Arterial Network of the Arm - *ESAIM: Mathematical Modelling and Numerical Analysis*, 2013, vol 47, 961-985. [Online] <http://www.esaim-m2an.org/articles/m2an/abs/2013/04/m2an120053/m2an120053.html>
- [22] Üljäseme verevarustus. [WWW] http://mobile.dspace.ut.ee/bitstream/handle/10062/18253/lajseme_verevarustus.html (20.05.2016)

Lisa 1 – Rõhulaine mudeli Matlab'i kood

```
%rõhud on toodud mmHg
%kogupikkuseks alates aordist kuni radiaalarterini võtan 69cm
%subclavian arter - 3.4cm, brahhiaalarter 42.2cm, radiaalarter 23.5cm

hetk1 = [linspace(67, 78.76, 4) linspace(78.76, 77.26, 65)]; %ajahetkel 0
hetk1a = [linspace(66, 78.01, 4) linspace(78.01, 75.38, 65)]; %hetkel 0.025
hetk2 = [linspace(69, 75.38, 4) linspace(75.38, 74.63, 65)]; %hetkel 0.05
hetk21 = [linspace(70.5, 74.26, 4) linspace(74.26, 73.5, 65)]; % hetkel 0.075
hetk3 = [linspace(83, 75.01, 4) linspace(75.01, 72.76, 65)]; %hetkel 0.1
hetk31 = [linspace(107, 81, 4) linspace(81, 71.25, 65)]; %hetkel 0.125
hetk4 = [linspace(113, 105.01, 4) linspace(105.01, 80.26, 65)]; %hetkel 0.15
hetk41 = [linspace(121.5, 120, 4) linspace(120, 101.26, 65)];%hetkel 0.175
hetk5 = [linspace(124.5, 129.76, 4) linspace(129.76, 119.26, 65)]; %hetkel 0.2
hetk51 = [linspace(122, 130, 4) linspace(130, 145.51, 65)];%hetkel 0.225
hetk6 = [linspace(117, 131.26, 4) linspace(131.26, 150.76, 65)]; %hetkel 0.25
hetk61 = [linspace(108, 132.76, 4) linspace(132.76, 147.39, 65)];%hetkel 0.275
hetk7 = [linspace(100, 126.26, 4) linspace(125.26, 133.51, 65)]; %hetkel 0.3
hetk71 = [linspace(95, 120, 4) linspace(120, 118.89, 65)];%hetkel 0.325
hetk8 = [linspace(88.5, 111.76, 4) linspace(111.76, 107.26, 65)]; %hetkel 0.35
hetk81 = [linspace(87, 107, 4) linspace(107, 102.38, 65)];%hetkel 0.375
hetk9 = [linspace(83.5, 108.76, 4) linspace(108.76, 97.51, 65)]; %hetkel 0.4
hetk91 = [linspace(77.5, 109.88, 4) linspace(109.88, 100.51, 65)];%hetkel 0.425
hetk10 = [linspace(76.5, 108.01, 4) linspace(108.01, 103.51, 65)]; %hetkel 0.45
hetk101 = [linspace(73, 106.88, 4) linspace(106.88, 105.38, 65)];%hetkel 0.475
hetk11 = [linspace(71, 105.01, 4) linspace(105.01, 107.26, 65)]; %hetkel 0.5
hetk111 = [linspace(69, 103.88, 4) linspace(103.88, 104.26, 65)];%hetkel 0.525
hetk12 = [linspace(68.5, 100.51, 4) linspace(100.51, 100, 65)]; %hetkel 0.55
hetk121 = [linspace(67, 97.51, 4) linspace(97.51, 97.51, 65)];%hetkel 0.575
hetk13 = [linspace(67.5, 94.51, 4) linspace(94.51, 94.76, 65)]; %hetkel 0.6
hetk131 = [linspace(67, 91.88, 4) linspace(91.88, 87.76, 65)];%hetkel 0.625
hetk14 = [linspace(66.5, 90.01, 4) linspace(90.01, 87.38, 65)]; %hetkel 0.65
hetk141 = [linspace(66, 88, 4) linspace(88, 86.63, 65)];%hetkel 0.675
hetk15 = [linspace(65.5, 87.01, 4) linspace(87.01, 86.26, 65)]; %hetkel 0.7
hetk151 = [linspace(65, 85, 4) linspace(85, 85.51, 65)];%hetkel 0.725
hetk16 = [linspace(64.5, 82.51, 4) linspace(82.51, 82.51, 65)]; %hetkel 0.75
hetk161 = [linspace(64, 81.76, 4) linspace(78.76, 81.38, 65)];%hetkel 0.775

for i=69
    laine=[hetk1(i) hetk1a(i) hetk2(i) hetk21(i) hetk3(i) hetk31(i) hetk4(i)
    hetk41(i) hetk5(i) hetk51(i) hetk6(i) hetk61(i) hetk7(i) hetk71(i)
    hetk8(i) hetk81(i) hetk9(i) hetk91(i) hetk10(i) hetk101(i) hetk11(i)
    hetk111(i) hetk12(i) hetk121(i) hetk13(i) hetk131(i) hetk14(i) hetk141(i)
    hetk15(i) hetk151(i) hetk16(i) hetk161(i)];
end;
figure
plot(laine);
xlabel('Ajahetk')
```

```

ylabel('Rõhk, mmHg')
axis([1 32 60 155]); %määran telgede piirid
F=getframe(gcf);

imshow(F.cdata);

```

Lisa 2 – Rõhust tulenev arteri laienemine

```

radial = [linspace(3.3, 3.53, 32)]; % radiaalarteri laiused
laienenudradiaal = [3.3371 3.3297 3.3223 3.3148 3.3074 3.3 3.3445 3.441 3.5003
3.5152 3.53 3.5226 3.5077 3.4929 3.4781 3.4484 3.4187 3.4335 3.4558 3.4706
3.4781 3.4632 3.4261 3.4113 3.4039 3.3965 3.389 3.3816 3.3742 3.3668 3.3594
3.3519];
axill_brach = [linspace(6.4, 7.04, 32)]; % aksillaar- ja brahhiaalarterite
laiused, laius on vahemikus 4.7-8.1
laienenudaxil = [6.5032 6.4826 6.4413 6.4 6.4206 6.4619 6.6684 6.9161 6.9574
6.9987 7.04 7.0194 6.9781 6.9368 6.8955 6.7923 6.751 6.8129 6.8335 6.8748
6.8542 6.7716 6.7303 6.7097 6.6890 6.6477 6.6271 6.6065 6.5858 6.5652 6.5445
6.5239];
subclavian = [linspace(10.25,11.275 , 32)]; % rangluualuse arteri laiused,
laius on vahemikus 9-11.5
laienenudsub = [10.4815 10.4153 10.6468 10.7129 10.8782 11.0766 11.1427 11.2089
11.275 11.2419 11.1758 11.1097 11.0435 11.0105 10.9774 10.9444 10.9113 10.8452
10.8121 10.779 10.746 10.6798 10.5806 10.4815 10.5145 10.4815 10.4484 10.3823
10.3492 10.3161 10.2831 10.25];
r6hkradial = [77.26 75.38 74.63 73.5 72.76 71.25 80.26 101.26 119.26 145.51
150.76 147.39 133.51 118.89 107.26 102.38 97.51 100.51 103.51 105.38 107.26
104.26 100 97.51 94.76 87.76 87.38 86.63 86.26 85.51 82.51 81.38]; % rõhk
radiaalarteris kaugusel aordist 69cm.
r6hkaxil = [78.0569 76.7772 75.0284 73.9038 73.9553 76.4297 93.4084 111.2156
124.8381 137.2703 140.4006 139.6178 129.1272 119.4797 109.6506 104.8344
103.4866 105.4878 105.9006 106.1769 106.0647 104.0581 100.2709 97.51 94.6272
89.9488 88.7772 87.3578 86.6584 85.2391 82.51 79.9881]; %kaugusel 35cm
r6hksub = [67 66 69 70.5 83 105 110 121.5 124.5 122 117 108 100 95 88.5 87 83.5
77.5 76.5 73 71 69 68.5 67 67.5 67 66.5 66 65.5 65 64.5 64]; %rõhk
rangluualuses arteris kaugusel aordist 1cm.
radiaaltelg = [77.26 101.26 147.39 102.38 105.38 97.51 86.63 81.38];
axiltelg = [78.0569 73.9553 137.2703 129.1272 119.4797 106.0647 94.6272 86.6584
79.9881];
subtelg = [67 83 124.5 100 83.5 71 67.5 65.5 64];

```

figure
for blue1=1:16
for paksus1= 1:16

```

    pilt1=plot(laienenudradiaal, 'LineWidth', 0.1*paksus1, 'Color', [1, 0,
1/blue1]);
    end;
end;
xlabel('Rõhk, mmHg')
ylabel('Diameeter, mm')
set(gca,'XTickLabel',[radiaaltelg] );
F=getframe(gcf);
imshow(F.cdata);

figure
for blue2=1:16
    for paksus2= 1:16
        pilt2=plot(laienenudaxil, 'LineWidth', 0.1*paksus2, 'Color', [1, 0,
1/blue2]);
        end;
    end;
xlabel('Rõhk, mmHg')
ylabel('Diameeter, mm')
set(gca,'XTickLabel',[axilte] );
F=getframe(gcf);
imshow(F.cdata);

figure
for blue3=1:16
    for paksus3= 1:16
        pilt3=plot(laienenudsub, 'LineWidth', 0.1*paksus3, 'Color', [1, 0,
1/blue3]);
        end;
    end;
xlabel('Rõhk, mmHg')
ylabel('Diameeter, mm')
set(gca,'XTickLabel',[subtelg] );
F=getframe(gcf);
imshow(F.cdata);

```


Lisa 3 – Dünaamilise mudeli visualiseerimise Matlab'i kood

```
pikkus =[linspace(1, 30, 32)]; %radiaalarteri pikkus on 30cm, 2 täislaine
kuvamiseks on punkte 32
laine =[77.26 74.63 72.76 80.26 119.26 150.76 133.51 107.26 97.51 103.51 107.26
103.88 96.76 88.51 86.26 81.01 77.26 74.63 72.76 80.26 119.26 150.76 133.51
107.26 97.51 103.51 107.26 103.88 96.76 88.51 86.26 81.01]; % pulsilaine
väärtused

plot(pikkus, laine, '-rs', 'LineWidth', 1);
xlabel('Ajahetk')
ylabel('Rõhk, mmHg')
axis([1 30 65 155]); %määran telgede piirid
F=getframe(gcf);
imshow(F.cdata);
```