مجله مهندسی مکانیک مدرس، تیر 1395، دوره 16، شماره 4، ص‌ص 315-323

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

تأثیر افزایش سن بر مناطق مستعد گرفتگی در سیستم ورتبروبازیلار: مطالعه معیار شاخص برش نوسانی و تنش برشی میانگین دیواره

علی سالاری[1]، علیرضا شریفی[2]، حمید نیازمند[3*]

1- دانشجوی کارشناسی، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد
2- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد
3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد
* مشهد، صندوق پستی 91775-111، niazmand@um.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 30 دی 1394
پذیرش: 05 فروردین 1395
ارائه در سایت: 01 اردیبهشت 1395

کلید واژگان:
شریان بازیلار
شریان ورتبرال
شریان خلفی
تنش برشی دیواره
شاخص برش نوسانی

چکیده

انسداد شریان سیستم ورتبروبازیلار از جمله عوامل خطرساز در بروز مرگ و میرهای ناشی از سکته مغزی است که احتمال گرفتگی این عروق شدیدا وابسته به سن افراد می‌باشد. در این مطالعه ناحیه‌های مستعد گرفتگی در سیستم ورتبروبازیلار در سنین مختلف 20، 50 و 70 مورد بررسی قرار گرفته است. روش تحقیق به صورت عددی بوده و از نرم‌افزار فلوئنت به منظور حل معادلات استفاده شده است. به وسیله‌ی شبیه‌سازی جریان خون در سیستم ورتبروبازیلار ناحیه‌های مستعد گرفتگی مورد بررسی قرار گرفته است. جهت تعیین نواحی مستعد گرفتگی، مقادیر بحرانی تنش برشی میانگین دیواره و شاخص برش نوسانی مورد استفاده قرار گرفته است. توزیع تنش برشی میانگین دیواره و شاخص برش نوسانی بر روی سیستم ورتبروبازیلار فرد 20 ساله نشان می‌دهد که احتمال گرفتگی در این سن چندان بالا نمی‌باشد؛ اما با افزایش سن، مقادیر شاخص برش نوسانی به ویژه در شریان ورتبرال راست و در محل اتصال عروق ورتبرال به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش پیدا می‌کند و به حد بحرانی می‌رسد، وسعت مناطقی که دارای تنش برشی میانگین دیواره پایینی می‌باشند نیز به شدت افزایش پیدا می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش سن و رسیدن به سن 70 سالگی، ناحیه مستعد گرفتگی در محل اتصال عروق ورتبرال به سوی شریان ورتبرال راست پیشروی می‌کند و بر وسعت منطقه‌ی مستعد گرفتگی می‌افزاید. هم‌چنین خطر گرفتگی در سایر محل‌هایی که در سن 50 سالگی نیز احتمال وقوع گرفتگی در آن‌ها وجود دارد، در سن 70 سالگی به‌طور محسوسی افزایش پیدا می‌نماید.

Aging effects on atherosclerosis susceptible sites in vertebrobasilar system: studying oscillatory shear index and averaged wall shear stress criteria

Ali Salari, Alireza Sharifi, Hamid Niazmand*

Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
* P.O.B. 91775-111 Mashhad, Iran, niazmand@um.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 20 January 2016
Accepted 24 March 2016
Available Online 20 April 2016

Keywords:
Basilar Artery
Vertebral Artery
Posterior Artery
Wall Shear Stress
Oscillatory Shear Index

ABSTRACT

Vertebrobasilar system stenosis is one of the risk factors for deaths caused by stroke, the risk of stenosis in these arteries highly depends on the person's age. In the present study, atherosclerosis susceptible sites in vertebrobasilar system at different ages of 20, 50 and 70 have been investigated. Numerical method (Fluent software) is employed to solve the equations. Blood flow is simulated in these arteries to investigate probable risky sites (prone to stenosis). To find these locations, critical values of the averaged wall shear stress (AWSS) and oscillatory shear index (OSI) have been studied. By considering the AWSS and OSI criteria in a 20 year-old person it becomes clear that the risk of stenosis is not considerable at this age, however, ageing increases OSI figures in the right vertebral artery and in its junction reaching to the critical values, besides, at this age the area of the sites with lower amount of AWSS is stretched significantly. Inaddition at the age of 70, risky sites are expanded toward right vertebral artery. Furthermore the risk of stenosis in all determined risky sites of age 50 increased at the age of 70.

1- مقدمه

وظیفه عروق خونی در بدن انتقال خون به اعضای مختلف است. عروق خونی از لایه نازکی از سلول‌ها به نام اندوتلیوم[1] پوشانده شده‌اند. به گفته محققان، تصلب شریان یا سختی شریان بر اثر آسیب رسیدن به اندوتلیوم به وجود می‌آید که از جمله‌ی عوامل آن فشار خون می‌باشد. بگونه‌ای که صدمه به شریان باعث تشکیل پلاکت‌ها می‌گردد که باعث ایجاد برآمدگی در شریان می‌شود. هر آنچه بیماری سختی شریان پیشروی می‌کند، برآمدگی در شریان نیز بزرگ‌تر می‌شود تا زمانی که به اندازه‌ای بزرگ می‌شود که باعث انسداد شریان می‌گردد که از عواقب آن بیماری‌های قلبی-عروقی می‌باشد [1].

[1] Endothelium

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
A. Salari, A. Sharifi, H. Niazmand, Aging effects on atherosclerosis susceptible sites in Vertebrobasilar System: studying oscillatory shear index and averaged wall shear stress criteria, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 4, pp. 315-323, 2016 (in Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.4.25.4]

باتوجه به خطرات گرفتگی عروق و عواقبی که در پی دارد، بررسی نواحی مستعد گرفتگی و میزان احتمال وقوع آن امری ضروری به نظر می‌رسد، از جمله این عروق مهم که باید مورد توجه قرار گیرد؛ سیستم ورتبروبازیلار[1] می‌باشد. ورتبروبازیلار یک سیستم بی‌نظیر در بدن انسان است به‌طوری‌که دو شریان ورتبرال راست[2] و شریان وتبرال چپ[3] به یکدیگر متصل شده و شریان بازیلار[4] را تشکیل می‌دهند. شریان بازیلار نقش حیاتی را در بدن انسان ایفا می‌کند؛ زیرا جریان خون را از طریق شریان ورتبرال راست و شریان ورتبرال چپ به شریان خلفی مغزی راست[5] و شریان خلفی مغزی چپ[6] انتقال می‌دهد که این دو شریان خلفی به حلقه ویلیس[7] که یکی از مهم‌ترین شبکه‌های بدن انسان است متصل می‌شوند [2].

کارو و همکاران [3] در سال 1971 پیشنهاد دادند که پایین بودن تنش برشی دیواره[8] می‌تواند منجر به ایجاد صدمه در شریان شود. در سال 1985 معیار دیگری توسط کو و همکاران [4] به نام شاخص برش نوسانی[9] برای شناسایی مناطق مستعد ایجاد صدمه ارائه شد.

در سال 1991 لو و یانگ [5] دریافتند، اگرچه معیار تنش برشی دیواره به منظور شناسایی مناطق مستعد گرفتگی مناسب بوده است اما این نواحی تطابق بسیار خوبی با ناحیه‌هایی که دارای تنش برشی دیواره پایینی می‌باشند را ندارد. براساس بررسی‌های نایت و همکاران [6] در سال 2010 و هم چنین ریختگر و همکاران [7] در سال 2012، اگرچه میانگین تنش برشی دیواره می‌توانست کمک خوبی برای شناسایی محل تجمع پلاکت‌ها باشد؛ اما معیار شاخص برش نوسانی دارای خطای کمتری در این زمینه است. همچنین در سال 2012 ژانگ و همکاران [8] بیان داشتند معیار شاخص برش نوسانی از میانگین تنش برشی دیواره برای شناسایی مناطق گرفتگی مناسب‌تر می‌باشد. باتوجه به مطالعات صورت گرفته [6-8] می‌توان نتیجه گرفت که معیار میانگین تنش برشی دیواره به تنهایی دقت مناسبی در تعیین محل‌های مستعد گرفتگی ندارد و بهتر است، معیار شاخص برش نوسانی نیز در تحقیقات مورد ارزیابی قرار گیرد.

در سال‌های گذشته مطالعاتی بر روی سیستم ورتبروبازیلار انجام شده است. در سال 1995 فوجی و همکاران [9] تحقیقی را با هدف بررسی تغییر قطر شریان بازیلار و تأثیر آن بر شدت جریان خون عبوری انجام دادند. در این تحقیق مشخص گردید، انقباض شریان بازیلار اثری بر مقدار جریان عبوری خون از این شریان ندارد. همچنین والنسیا و همکاران [10] در سال 2004 تحقیقاتی را بر روی شریان بازیلار انجام دادند که در این نمونه‌ها در بین دو شریان خلفی چپ و راست، انشعابی کیسه مانند در نظر گرفته شده بود. هدف از انجام این تحقیق مقایسه نحوه‌ی توزیع سرعت جریان خون و تنش برشی دیواره در این کیسه‌ها بود.

در سال 2012، واک باک و همکاران [11] بر روی شریان‌های ورتبرال و شریان بازیلار آزمایشاتی انجام دادند. در این آزمایش‌ها که شریان‌ها به‌صورت سه‌بعدی طراحی شده بودند، توزیع تنش برشی دیواره و شاخص برش نوسانی در قالب کانتور ارائه شد. ابعاد در نظر گرفته شده برای شریان‌ها در این تحقیق، منحصر به حالت خاصی بوده و هندسه آن چندان قابل تعمیم نیست.

لی و همکاران [12] در سال 2011 ناحیه‌ای که دارای میانگین تنش برشی دیواره کمتری است را به دو صورت تحلیل ساختاری و شبیه‌سازی جریان خون بدست آورده‌اند؛ هدف این تحقیق توجیه صحت روش تحلیل ساختاری برای تعیین کمترین تنش برشی دیواره در شریان بازیلار است. روش تحلیل ساختاری تنها یک ناحیه با تنش برشی پایین را تعیین کرده و از سایر نواحی با تنش برشی دیواره پایین چشم پوشی می‌کند که البته چندان کاربردی نیست و روش شبیه‌سازی جریان خون صحیح‌تر به نظر می‌رسد. در سال 2007، شین و همکاران [2] توزیع تنش برشی دیواره را در شریان بازیلار و شریان‌های خلفی به صورت دو بعدی ارائه دادند. در این آزمایش جریان خون نیوتنی فرض شده و هم‌چنین از انحنای شریان بازیلار چشم‌پوشی گردیده است.

در سال 2012 بوکمن و همکاران [13] با استفاده از عکس‌های ام‌آرآی[10] مدلی سه بعدی از سیستم ورتبروبازیلار تهیه کردند. در این تحقیق ایشان جریان ورودی شریان‌های ورتبرال را به صورت موجی اعمال و سپس نحوه‌ی حرکت خون در سیستم ورتبروبازیلار را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند. در این آزمایش نتایج شبیه‌سازی‌عددی و آزمایشگاهی به‌طور مناسبی با یکدیگر تطابق داشتند.

همانطور که مشاهده می‌شود، تحقیقات مختلفی در زمینه‌ی تحلیل سیستم ورتبروبازیلار انجام شده است. در بسیاری از این تحقیقات تنها به قسمت محدودی از هندسه سیستم ورتبروبازیلار اختصاص داشته است و تأثیری که خون به موجب عبور از عروق ماقبل خود پذیرفته در نظر گرفته نشده است [2, 10, 12, 13]. تاکنون در تحقیقات انجام گرفته بر روی سیستم ورتبروبازیلار [9-13] تأثیر افزایش عمر بر روی هندسه این سیستم در نظر گرفته نشده است؛ مانند تغییر قطر عروق و تغییر زاویه شریان بازیلار.

با توجه به میزان دقت بالای شاخص برش نوسانی در شناسایی مناطق مستعد گرفتگی [6-8]، در مطالعه‌ی حاضر توزیع شاخص برش نوسانی در سیستم ورتبروبازیلار در سنین مختلف به دقت مورد بررسی قرار گرفته است. اما میزان تنش برشی میانگین دیواره نیز از جمله‌ی معیارهایی دیگری می‌باشد که به منظور شناسایی منطق مستعد گرفتگی به کار گرفته می‌شود و در اکثر تحقیقات انجام گرفته بر روی سیستم ورتبروبازیلار مورد استفاده قرار گرفته است [2, 10, 12, 13]، بنابراین با توجه به اهمیت این معیار و توانایی آن جهت شناسایی برخی مناطق مستعد گرفتگی، در مطالعه‌ی حاضر نیز این معیار مورد بررسی قرار گرفته شده تا بتوان از مقایسه نتایج بدست آمده از هر دو معیار تنش برشی میانگین دیواره و شاخص برش نوسانی، مناطق مستعد گرفتگی را بهتر شناسایی کرد. در این مقاله برای اولین بار تأثیرات افزایش عمر بر هندسه طراحی شده در نظر گرفته شده است و هم‌چنین جریان ورودی خون به صورت پروفیل سرعت حقیقی اعمال شده، به جهت انجام مطالعه دقیق جریان خون به صورت غیرنیوتنی منظور شده است.

2- معادلات حاکم

معادله پیوستگی به‌صورت رابطه‌ی (1) است:

$$\vec{\nabla}.\vec{V} = 0 \qquad (1)$$

معادله ناویر-استوکس به صورت رابطه‌ی (2) است:

$$\rho\left(\frac{\partial\vec{V}}{\partial t} + \vec{V}.\vec{\nabla}\vec{V}\right) = -\vec{\nabla}P + \vec{\nabla}.(\vec{S}) \qquad (2)$$

[1] Vertebrobasilar System
[2] Right Vertebral Artery (RVA)
[3] Left Vertebral Artery (LVA)
[4] Basilar Artery (BA)
[5] Right Posterior Cerebal Artery (RPCA)
[6] Left Posterior Cerebal Artery (LPCA)
[7] Circle of Willis
[8] Wall Shear Stress (WSS)
[9] Oscillatory Shear Index (OSI)
[10] MRI

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.4.25.4]

$$\vec{S} = 2\mu\vec{d} \quad (3)$$

$$\vec{d} = (\nabla\vec{V} + \nabla\vec{V}^{T})/2 \quad (4)$$

در معادلات (1) تا (4)، $\vec{V}$ معرف بردار سرعت و P معرف فشار می‌باشد. همچنین برای خون به عنوان یک سیال غیرنیوتنی، داریم:

$$\mu = \mu(\dot{\gamma}) \quad (5)$$

خون سیالی غیرقابل تراکم و با چگالی $\rho = 1053\ \mathrm{kg/m^3}$ در نظر گرفته شده است [11]. جهت بررسی رفتار غیرنیوتنی خون از مدل کارو استفاده شده است. معادله‌ی مدل کارو[1] عبارت است از:

$$\mu = \mu_\infty + (\mu_0 - \mu_\infty)[1 + (\lambda\dot{\gamma})^2]^{\frac{n-1}{2}} \quad (6)$$

در این مدل μ_0 نشان دهنده لزجت پایین، μ_∞ نشان دهنده لزجت بالا و $\dot{\gamma}$ نشان دهنده نرخ برشی است. در معادله کارو کمیت‌های n و λ نیز نحوه‌ی رفتار سیال غیرنیوتنی را بین دو لزجت بالا و پایین کنترل می‌کنند. ضرایب در نظر گرفته شده در معادله‌ی کارو برای جریان خون در جدول 1 بیان شده است [14].

3- مدل‌سازی و حل عددی

3-1- هندسه

در تحقیق حاضر هدف بررسی گرفتگی در سیستم ورتبروبازیلار و ارتباط آن با گذشت عمر است، به منظور دست‌یافتن به نتایج صحیح، سیستم ورتبروبازیلار مطابق با مشخصات عروق افرادی با سنین 20، 50 و 70 سال طراحی شده است، به منظور راحتی بیان مخفف نام عروق سیستم ورتبروبازیلار در جدول 2 درج شده است.

طراحی شریان بازیلار بر مبنای تحقیقات جونگ و همکاران [15] انجام شده است. باتوجه به اطلاعات موجود از شریان بازیلار می‌توان دریافت که با افزایش سن زاویه‌ی اتصال عروق ورتبرال چپ و راست به شریان بازیلار افزایش پیدا می‌کند و به همینگونه در محل جدا شدن عروق خلفی از شریان بازیلار نیز افزایش زاویه جدایی دیده می‌شود. اطلاعات مربوط به شریان بازیلار برای سنین مختلف در جدول 3 ذکر شده است. شکل 1 درک بهتری ازپارامترهای به کار رفته در جدول 3 را نشان می‌دهد.

در طراحی شریان ورتبرال چپ در سنین مختلف از تحقیقات اسکل و همکاران [16] استفاده شده است، همانگونه که در جدول 4 مشاهده می‌گردد قطر شریان ورتبرال چپ با افزایش سن از 20 سال به 50 سال مقداری کاهش یافته است این در صورتی است که با گذشت زمان و افزایش سن از 50 سال به 70 سال افزایش قابل توجهی در قطر شریان ورتبرال چپ رخ می‌دهد.

در طراحی شریان ورتبرال راست در سنین مختلف نیز از تحقیقات کیزیل‌کیلیک و همکاران [17] و جونگ و همکاران [15] بهره برده شده است که مشخصات این شریان در جدول 5 ارائه شده است. همانطور که در جدول 5 مشاهده می‌شود با افزایش سن بر قطر شریان ورتبرال راست افزوده می‌شود.

نتایج تحقیقات راوال و جاداو [18] نیز با مقادیر ذکر شده در جدول 5 تطابق دارد.

مشخصات شریان‌های خلفی چپ و راست برای سنین 20، 50 و 70 نیز بر اساس نتایج تحقیقات دیوالت و همکاران [19] انتخاب شده است، بر مبنای این تحقیقات می‌توان قطر شریان خلفی راست و چپ را با یکدیگر برابر در نظر گرفت. در جدول 6 قطر عروق خلفی مشخص شده است. در طراحی سیستم ورتبروبازیلار به منظور اعمال انحنای مطابق با واقعیت، در عروق ورتبرال راست و چپ از تحقیقات واک باک و همکاران [11] استفاده

جدول 1 ضرایب معادله‌ی کارو برای جریان خون [14]

Table 1 Coefficient of Carreau model for flow of blood [14]

ضرایب	مقدار	واحد
μ_0	0.056	$kgm^{-1}s^{-1}$
μ_∞	0.0035	$kgm^{-1}s^{-1}$
λ	3.313	s
n	0.3568	-

جدول 2 مخفف نام لاتین عروق سیستم ورتبروبازیلار

Table 2 Abbreviation of vertebrobasilar system vessels

نام به لاتین	نام به مخفف لاتین
Left Vertebral Artery	LVA
Right Vertebral Artery	RVA
Left Posterior Cerebal Artery	LPCA
Right Posterior Cerebal Artery	RPCA
Basilar Artery	BA

[1] Carreau Model

جدول 3 مشخصات شریان بازیلار در سنین مختلف [15]

Table 3 Characteristics of basilar artery at different ages [15]

	39-20	59-50	79-70	واحد
فاصله نقطه اتصال و جدایی (l)	25.6	27.0	27.5	mm
زاویه اتصال (φ)	13.2	16.5	16.6	°
زاویه جدایی (ω)	12.3	14.3	14.7	°
مساحت مثلث	35.9	48.3	50.9	mm^2
ارتفاع مثلث	2.8	3.6	3.7	mm

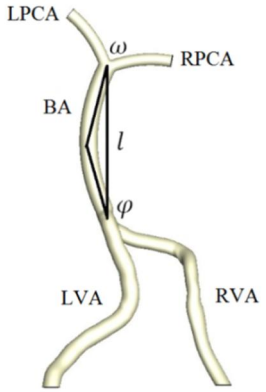

Fig. 1 Designed vertebrobasilar system

شکل 1 سیستم ورتبروبازیلار طراحی شده

جدول 4 قطر شریان ورتبرال چپ در سنین مختلف [16]

Table 4 Diameter of left vertebral artery at different ages [16]

سن	قطر	واحد
20-39	3.3	mm
40-59	3.2	mm
60-85	3.6	mm

جدول 5 قطر شریان ورتبرال راست در سنین مختلف [17,15]

Table 5 Diameter of right vertebral artery at different ages [15,17]

سن	قطر	واحد
20-39	3.1	mm
50-59	3.2	mm
70-79	3.4	mm

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.4.25.4]

جدول 6 قطر شریان های خلفی[19]

Table 6 Diameter of posterior arteries [19]

شریان	قطر	طول	واحد
خلفی راست	1.1	10.9	mm
خلفی چپ	1.1	10.9	mm

شده است.

در شکل 2 می‌توان از چندین نمای متفاوت سیستم ورتبروبازیلار طرحی شده برای فرد 20 ساله را مشاهده کرد.

3-2- حل عددی

دیواره‌ی شریان، صلب با اعمال شرط عدم لغزش و بدون اثرات ویسکوالاستیکی لحاظ شده است. اگرچه اثر حرکت دیواره شریان می‌تواند تأثیرگذار و مهم باشد، اما به دلیل نبود اطلاعات کافی از الاستیسیته دیواره-های شریان در سنین مختلف، فرض ذکر شده اعمال گردیده است. جریان ورودی خون به شکل پروفیل سرعت توسعه یافته و واقعی در نظر گرفته شده است؛ در این راستا از مشخصات جریان خون در تحقیقات اسکل و همکاران [16] و پروفیل سرعت خون در تحقیقات واک باک و همکاران [11] استفاده شده است؛ جزئیات پروفیل جریان خون برای سنین مختلف در جدول 7 موجود است. بیشینه عدد رینولدز[1] در محدوده 437 تا 463 متغیر می‌باشد، بنابراین حرکت خون در سیستم ورتبروبازیلار آرام فرض شده است.

در این تحقیق به منظور حل جریان در سیستم ورتبروبازیلار که برای سنین مختلف طراحی شده از نرم افزار فلوئنت[2] استفاده گردیده است، گام زمانی 0.001 ثانیه در نظر گرفته شده است و برای بالا بردن دقت و اطمینان به صحت داده‌های خروجی، نتایج شبیه‌سازی از سیکل[3] سوم جریان خون بدست آمده است.

4- نتایج

4-1- اعتبارسنجی

باتوجه به این که از حل جریان در عروق بازیلار اطلاعاتی برای اعتبارسنجی موجود نبود، نتایج حل در مطالعه حاضر توسط نتایج بدست آمده از حل جریان خون غیرنیوتنی در سیفون کاروتید[4] داخلی [20] اعتبارسنجی شده است؛ زیرا عروق کاروتید از لحاظ پیچیدگی‌های هندسی تشابه مناسبی با سیستم ورتبروبازیلار دارد و به لحاظ موقعیت مکانی نیز عروق کاروتید و سیستم ورتبروبازیلار در نزدیکی یکدیگر قرار دارند.

Fig. 2 Vertebrobasilar system that has been designed for a 20 year old man

شکل 2 سیستم ورتبروبازیلار طراحی شده برای فرد 20 ساله

[1] Reynolds Number
[2] Fluent
[3] Cycle
[4] Carotid

نتایج مطالعه حاضر با پروفیل سرعت محوری در سیفون کاروتید داخلی با جریانی آرام غیرنیوتنی و متغیر با زمان مقایسه شده و تطابق مناسبی ملاحظه می‌شود. پروفیل سرعت محوری برروی خط 1، شکل 3-1 نمایش داده شده است که در این شکل نتایج مطالعه حاضر توسط نقاط دایره‌ای و نتایج شریفی و نیازمند [20] توسط خط صاف نمایش داده شده‌اند. جهت اطمینان بیشتر از صحت نتایج حل برروی خط شماره 2 نیز اعتبارسنجی صورت گرفته است (شکل 3-2).

4-2- استقلال از شبکه

سیستم ورتبروبازیلار طراحی شده در سنین مختلف 20، 50 و 70 سال شباهت بسیار نزدیکی به یکدیگر دارند به‌طوری که تنها تفاوت کوچکی در قطر عروق و زاویه شریان بازیلار وجود دارد. برای نمونه سیستم ورتبروبازیلار فرد 20 ساله به منظور بررسی استقلال از شبکه انتخاب شد.

در مجموع پنج شبکه با اندازه‌های 80 هزار، 120 هزار، 180 هزار، 240 هزار و 300 هزار سلول تولید شد. مقایسه سرعت محوری جریان خون در شریان بازیلار در شبکه‌های متفاوت نشان می‌دهد که شبکه‌های بزرگ نتایجی دور افتاده‌تر نسبت به شبکه‌های ریزتر دارند، بگونه‌ای که هر چه شبکه ریزتر می‌گردد، نتایج به یکدیگر نزدیک می‌شوند. بر اساس ارزیابی‌های صورت گرفته نتایج بدست آمده از شبکه‌های به اندازه 240 هزار سلول و 300 هزار سلول بسیار مشابه هم بوده که در نهایت شبکه با تعداد 300 هزار سلول برای این مطالعه انتخاب شد.

4-3- جریان خون

سرعت محوری جریان خون از جمله فاکتورهای مهم در تعیین مناطقی است

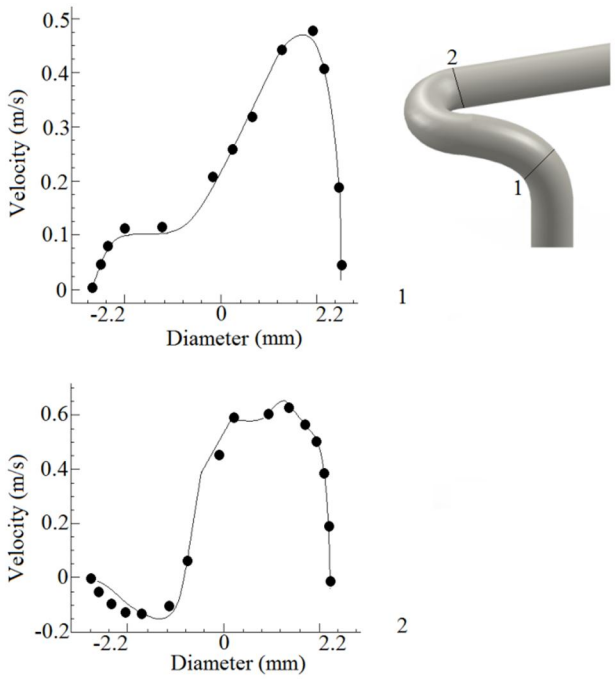

Fig. 3 (1) Comparison of the axial velocity profiles of Sharifi and Niazmand [20] with present study results (circles) on line 1; (2) Comparison of the axial velocity profiles of Sharifi and Niazmand [20] with present study results (circles) on line 2

شکل 3 (1) مقایسه پروفیل سرعت محوری روی خط 1 در مطالعه حاضر (نقاط دایره‌ای) با نتایج شریفی و نیازمند [20] (2) مقایسه پروفیل سرعت محوری روی خط 2 در مطالعه حاضر (نقاط دایره‌ای) با نتایج شریفی و نیازمند [20]

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.4.25.4]

جدول 7 مشخصات جریان خون در سیستم ورتبروبازیلار در سنین مختلف [16]

Table 7 Characteristics of blood flow in vertebrobasilar system at different ages [16]

سن	حداکثر سرعت در شریان ورتبرال چپ (m/s)	حداکثر سرعت در شریان ورتبرال راست (m/s)	میانگین سرعت در شریان ورتبرال چپ (m/s)	میانگین سرعت در شریان ورتبرال راست (m/s)	حجم خون ورودی در شریان ورتبرال چپ (mL/min)	حجم جریان در شریان ورتبرال راست(mL/min)
20	0.49	0.38	0.24	0.15	106	68
50	0.45	0.34	0.22	0.14	102	65
70	0.43	0.33	0.21	0.13	109	70

که می‌تواند منجر به رسوب ذرات چربی در کنار دیواره شریان شود؛ لذا ارتباط این فاکتور مهم را با افزایش سن بر روی شریان بازیلار که از پراهمیت‌ترین عروق در سیستم ورتبروبازیلار است، مشاهده کرده‌ایم. همانطور که در شکل 4 دیده می‌شود، پروفیل توسعه یافته سرعت در اثر نیروهای گریز از مرکز در وسط خم به سمت دیواره خارجی متمایل شده است و این الگو در پایین دست خم نیز مشاهده می‌شود. با مقایسه جریان خون در سنین مختلف مشخص می‌شود که رفتار کلی جریان خون در سن 50 سالگی تفاوت چندانی با سن 20 سالگی ندارد، اما شکل 5 که پروفیل سرعت خون بر روی خط 2 در شکل 4 می‌باشد، مشخص می‌کند که سرعت جریان خون بطور قابل توجهی کاهش پیدا کرده است که این خود می‌تواند، فرصت مناسبی را برای انباشت ذرات چربی در سرعت‌های نزدیک به صفر در کنار دیواره شریان فراهم کند. سرعت جریان خون در فرد 70 ساله که در شکل 5 مشخص شده است اگرچه نسبت به فرد 50 ساله کاهش زیادی پیدا نمی‌کند؛ اما به هر گونه به کم‌ترین مقدار خود رسیده و هر چه بیشتر احتمال رسوب ذرات چربی را افزایش می‌دهد.

با توجه به شکل 4 و شکل 5 می‌توان نتیجه گرفت با افزایش عمر سرعت محوری کاهش پیدا کرده و احتمال انباشت ذرات چربی افزایش پیدا می‌کند؛ در هر سن نیز هر آنچه از محل اتصال عروق ورتبرال به محل اتصال عروق خلفی پیش می‌رویم این احتمال در جداره داخلی خم ازدیاد می‌یابد.

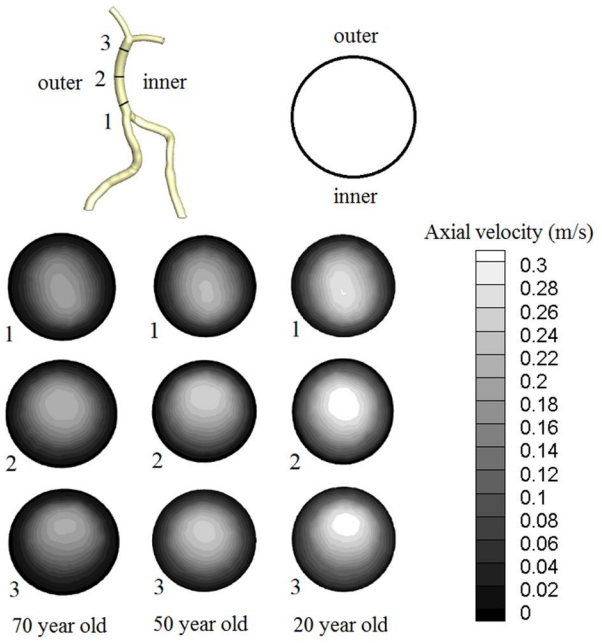

Fig. 4 Axial velocity at basilar artery for 20, 50 and 70 year old man

شکل 4 توزیع سرعت محوری در شریان بازیلار برای فرد 20، 50 و 70 ساله

4-4- تنش برشی دیواره

تنش برشی دیواره از جمله معیارهای مطرحی است که جهت شناسایی نواحی مستعد گرفتگی مورد استفاده قرار می‌گیرد [5-8]، اگرچه این معیار نمی‌تواند تمامی مناطق مستعد گرفتگی را به خوبی شناسایی کند؛ اما توانایی شناسایی برخی مناطق مستعد گرفتگی و محدوده آن را دارد و در بسیاری از تحقیقات انجام گرفته بر روی سیستم ورتبروبازیلار از این معیار نیز استفاده شده است [2, 10, 11, 12, 13]، با توجه به اهمیت بسیار این معیار و فراهم ساختن امکان مقایسه نتایج بدست آمده جهت شناسایی مناسب‌تر نواحی مستعد گرفتگی، در مطالعه‌ی حاضر نیز معیار تنش برشی میانگین دیواره مورد بررسی قرار گرفته است. جهت بررسی و مقایسه احتمال گرفتگی عروق، کانتورهای تنش برشی میانگین دیواره در یک سیکل کاری برای افرادی با سنین 20، 50 و 70 سال ارائه شده است. مقادیر تنش برشی متوسط کمتر از 0.5 پاسکال به عنوان مقادیر بحرانی شناخته می‌شود [8].

از جمله نواحی که احتمال گرفتگی در آن وجود دارد در محل اتصال عروق ورتبرال راست و ورتبرال چپ است. همانطور که در شکل 6 مشاهده می‌شود، برای یک فرد 20 ساله، در شریان ورتبرال راست و شریان ورتبرال چپ ناحیه‌هایی دارای تنش برشی میانگین نسبتا پایینی در حدود 0.70 پاسکال هستند اما باتوجه به اینکه مقادیر تنش برشی میانگین در این نواحی به مقدار بحرانی نرسیده است، احتمالی برای گرفتگی در این ناحیه‌ها وجود ندارد. اما در محل اتصال عروق ورتبرال به شریان بازیلار، تنش برشی میانگین به حد بحرانی رسیده است به‌طوری‌که حداقل تنش برشی میانگین در حدود

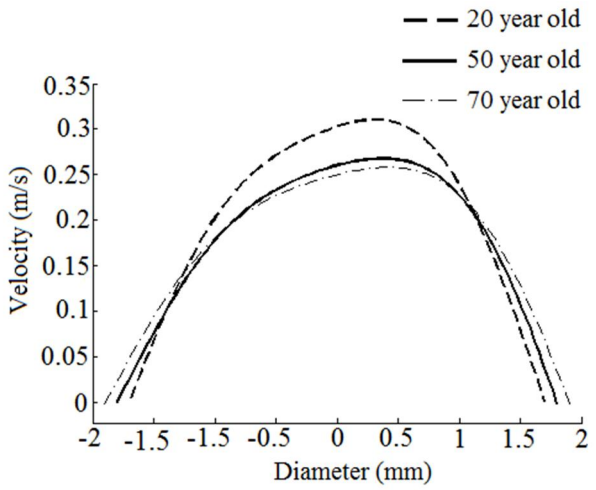

Fig. 5 Comparison of the axial velocity profiles on line 2 at basilar artery for 20, 50 and 70 year old man

شکل 5 مقایسه پروفیل سرعت محوری بر روی خط 2 در شریان بازیلار برای افرادی با سن‌های 20، 50 و 70 سال

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.4.25.4]

0.12 پاسکال می‌باشد و این مکان به عنوان یک ناحیه خطرناک محسوب می‌شود. بر روی شریان ورتبرال راست، در نزدیکی محل اتصال عروق، ناحیه‌ای کوچک با تنش برشی بحرانی دیده می‌شود که تنش برشی این مکان کمی پایین‌تر از 0.5 پاسکال می‌باشد و این مکان نیز به عنوان ناحیه‌ی مستعد گرفتگی محسوب می‌شود.

توزیع تنش برشی میانگین در محل اتصال عروق خلفی و شریان بازیلار در شکل 7 ارائه شده است که باتوجه به بالا بودن تنش برشی میانگین در عروق خلفی، احتمال گرفتگی در این عروق وجود ندارد و تنها بر روی دیواره شریان بازیلار و نزدیک به محل اتصال عروق بازیلار و خلفی، ناحیه‌ای با وسعت بسیار کم وجود دارد که تنش برشی میانگین دیواره پایین آمده است اما به حد بحرانی نرسیده و مستعد گرفتگی نیست.

شکل 8 نیز توزیع تنش برشی میانگین دیواره در محل اتصال عروق ورتبرال به شریان بازیلار در فرد 50 ساله را نشان می‌دهد، در طول شریان ورتبرال راست و شریان ورتبرال چپ ناحیه‌ای که مستعد گرفتگی باشد مشاهده نمی‌شود (حداقل تنش برشی در حدود 0.63 پاسکال) اما در نزدیکی محل اتصال شریان‌های ورتبرال، بر روی شریان ورتبرال راست ناحیه‌ای با تنش برشی میانگین دیواره 0.5 پاسکال که کمی پایین‌تر از مقدار بحرانی است، دیده می‌شود که دارای وسعت نسبتا زیادی می‌باشد، در محل اتصال عروق ورتبرال نیز یک ناحیه حساس دیگر که مستعد گرفتگی می‌باشد مشاهده می‌شود (حداقل تنش برشی در حدود 0.12 پاسکال).

با گذشت عمر از 20 سال به 50 سال افزایش احتمال گرفتگی در محل اتصال عروق ورتبرال دیده می‌شود؛ در ناحیه اتصال عروق خلفی به شریان بازیلار نیز ناحیه‌ای که در فرد 20 ساله محتمل گرفتگی نبود، حال در سن 50 سالگی میزان تنش برشی این ناحیه کمی پایین‌تر از 0.5 پاسکال بوده و مستعد گرفتگی است هر چند که وسعت آن کم می‌باشد که در شکل 9 می‌توان به خوبی این واقعیت را مشاهده نمود. در عروق خلفی هر چند که به‌طور کلی کاهش تنش برشی میانگین با افزایش سن مشاهده می‌شود؛ اما ناحیه‌ای که در آن تنش برشی میانگین به مقدار بحرانی رسیده باشد، دیده نمی‌شود.

با افزایش سن از 50 سال به 70 سال، مشاهده می‌شود که هم‌چنان عروق ورتبرال چپ و راست بر اساس معیار تنش برشی میانگین نمی‌توانند مستعد گرفتگی باشند (حداقل تنش برشی در حدود 0.62 پاسکال) (شکل 10). در سن 70 سالگی، محل اتصال عروق ورتبرال به شریان بازیلار هم‌چنان دارای تنش برشی میانگین بحرانی است (حداقل تنش برشی در حدود 0.12 پاسکال) و مستعد گرفتگی می‌باشد، البته همانند فرد 50 ساله ناحیه‌ای در شریان ورتبرال راست که در نزدیکی محل اتصال واقع شده است می‌تواند ناحیه‌ای مستعد برای گرفتگی باشد (تنش برشی در حدود 0.46 پاسکال)، با این وجود وسعت ناحیه خطرناک در فرد 70 ساله نسبت به فرد 50 ساله تغییر قابل ملاحظه‌ای نکرده است.

در عروق خلفی در سن 70 سالگی میزان تنش برشی میانگین مقداری

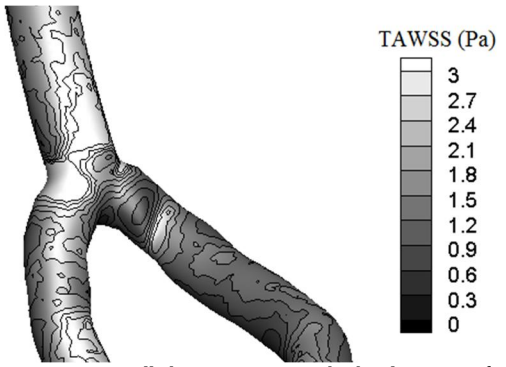

Fig. 6 Time average wall shear stress in vertebrobasilar system for a 20 year old man

شکل 6 توزیع تنش برشی میانگین دیواره در سیستم ورتبروبازیلار فرد 20 ساله

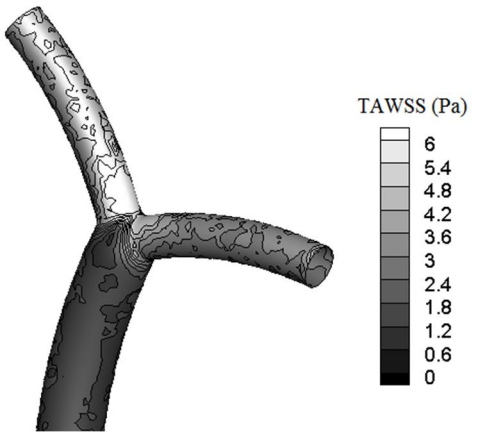

Fig. 7 Time average wall shear stress in posterior cerebal arteries for a 20 year old man

شکل 7 توزیع تنش برشی میانگین دیواره عروق خلفی در فرد 20 ساله

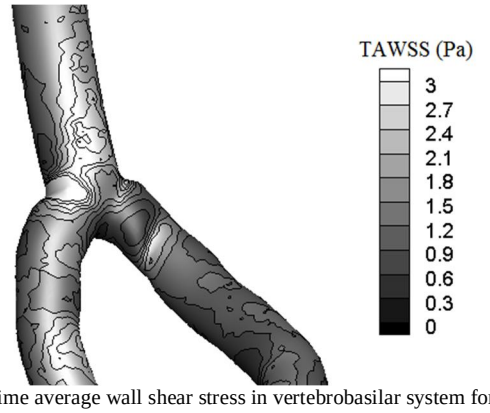

Fig. 8 Time average wall shear stress in vertebrobasilar system for a 50 year old man

شکل 8 توزیع تنش برشی میانگین دیواره در سیستم ورتبروبازیلار فرد 50 ساله

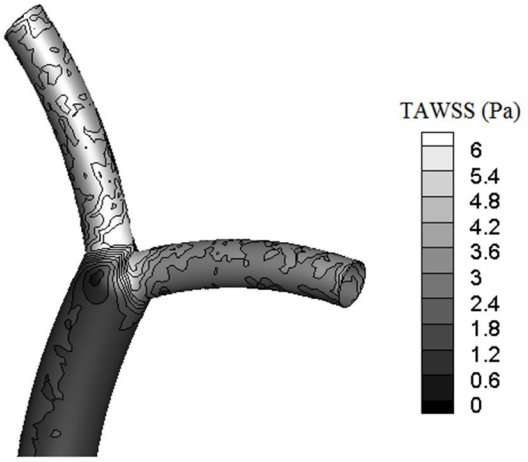

Fig. 9 Time average wall shear stress in posterior cerebal arteries for a 50 year old man

شکل 9 توزیع تنش برشی میانگین دیواره عروق خلفی در فرد 50 ساله

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.4.25.4]

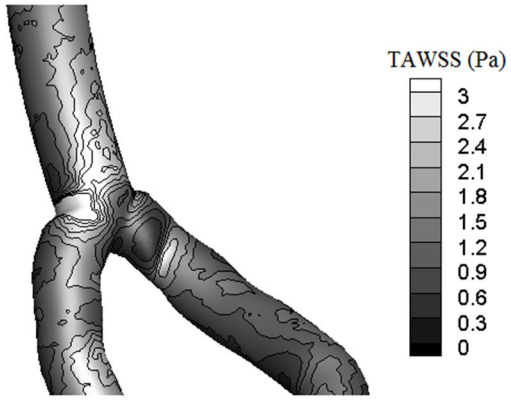

Fig. 10 Time average wall shear stress in vertebrobasilar system for a 70 year old man

شکل 10 توزیع تنش برشی میانگین دیواره در سیستم ورتبروبازیلار فرد 70 ساله

نسبت به سن 50 سالگی افزایش پیدا کرده است که می‌توان با مشاهده شکل 11 و مقایسه آن با شکل 9 به خوبی این مسئله را دریافت، بنابراین عروق خلفی در سن 70 سالگی نیز مستعد گرفتگی نمی‌باشند، در نزدیکی محل اتصال عروق و بر روی شریان بازیلار نیز مقدار تنش برشی کمی بالاتر از 0.5 پاسکال و در حدود 0.55 پاسکال است که چندان مستعد گرفتگی نمی‌باشد.

با مقایسه تنش برشی میانگین دیواره در سنین مختلف، مشخص می‌شود که در انسان با افزایش سن از 20 سال به سن 50 سال، نواحی مستعد گرفتگی به لحاظ وسعت گسترش قابل توجه‌ای می‌یابند؛ اما با افزایش سن و رسیدن به 70 سالگی، اگرچه تعداد نواحی محتمل گرفتگی و میزان گستردگی آن‌ها افزایش نمی‌یابد؛ اما با توجه به کاهش تنش برشی میانگین دیواره در این نواحی دارای احتمال بالاتری در وقوع گرفتگی می‌باشند.

4-5- شاخص برش نوسانی

معیار مهم دیگری که جهت تعیین محل‌های مستعد گرفتگی استفاده می‌شود و رفتار دقیق‌تری نسبت به تنش برشی دیواره از خود نشان می‌دهد، شاخص برش نوسانی می‌باشد که باتوجه به دقت این معیار می‌توان مکان‌های مستعد گرفتگی را صحیح‌تر شناسایی کرد [8, 7, 6]. حدود مقدار بحرانی شاخص برش نوسانی 0.035 می‌باشد [8] که با رسیدن به این مقدار ناحیه مربوطه

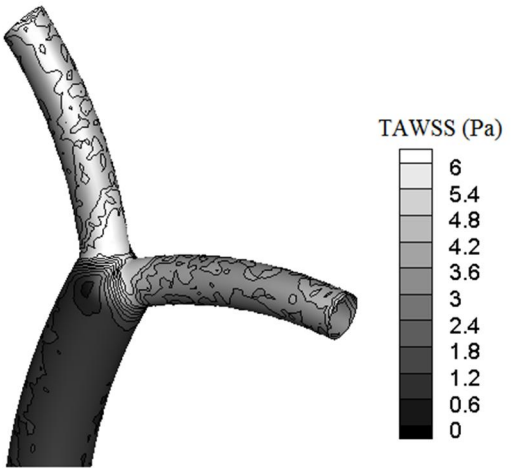

Fig. 11 Time average wall shear stress in posterior cerebal arteries for a 70 year old man

شکل 11 توزیع تنش برشی میانگین دیواره عروق خلفی در فرد 70 ساله

خطرناک شناسایی می‌گردد، که البته در پژوهش‌های پیشین بر روی سیستم ورتبروبازیلار کمتر مورد بررسی قرار گرفته است [13, 12, 10, 2]. در شکل 12 توزیع شاخص برش نوسانی برای سیستم ورتبروبازیلار یک فرد 20 ساله مشخص شده است، در شکل 12 همانطور که مشاهده می‌گردد، اکثر نواحی دارای برش نوسانی بسیار کمی می‌باشند که نمی‌توانند، مستعد گرفتگی باشند، اگرچه ناحیه‌های از این عروق دارای مقادیر بالایی از برش نوسانی هستند، اما مقدار آن‌ها فاصله چشم‌گیری از مقدار بحرانی دارد. در محل اتصال عروق ورتبرال به شریان بازیلار ناحیه‌ای مشاهده می‌گردد که مقدار برش نوسانی به‌طور قابل ملاحظه‌ای بالا می‌باشد و نیز در محل اتصال عروق خلفی ناحیه‌ای بر روی شریان بازیلار وجود دارد که دارای برش نوسانی بالایی است، اگرچه این نواحی نسبت به سایر مناطق سیستم ورتبروبازیلار بحرانی‌تر به نظر می‌رسند؛ اما هنوز به مرز مستعد بودن برای گرفتگی نرسیده‌اند و نمی‌توان احتمالی برای این نواحی به منظور گرفتگی قائل شد.

با توجه به توزیع شاخص برش نوسانی در سیستم ورتبروبازیلار فرد 50 ساله که در شکل 13 مشاهده می‌شود، در محل اتصال شریان‌های ورتبرال چپ و راست به شریان بازیلار و ناحیه‌ای از شریان ورتبرال راست که در نزدیکی محل اتصال عروق ورتبرال قرار دارد، شاخص برش نوسانی به مقدار 0.035 رسیده است که بنابراین مناطقی بحرانی و مستعد ایجاد گرفتگی می‌باشند، مناطقی که مقدار برش نوسانی آن‌ها در محدوده 0.026 الی 0.035 می‌باشد، اگرچه مقدار برش نوسانی در آن‌ها به 0.035 نرسیده است اما میزان برش نوسانی نزدیک به مقدار بحرانی است و احتمال وقوع گرفتگی بالا می‌باشد که نمی‌توان از آن چشم‌پوشی کرد؛ همانند ناحیه‌ای از شریان ورتبرال راست که بر روی ساق این شریان در نزدیکی ورودی واقع شده است.

در نزدیکی محل اتصال عروق خلفی به شریان بازیلار نیز می‌توان ناحیه‌ای بر روی شریان بازیلار که دارای برش نوسانی نسبتا بالایی است را مشاهده کرد، البته باتوجه به وسعت بسیار کم این ناحیه احتمال وقوع گرفتگی نمی‌تواند، بسیار بالا باشد. در عروق خلفی و ورتبرال چپ، باتوجه به پایین بودن مقدار برش نوسانی، احتمال گرفتگی وجود ندارد. در طول شریان بازیلار نیز هم‌چنان که در شکل 13 دیده می‌شود، احتمال گرفتگی بسیار پایین می‌باشد.

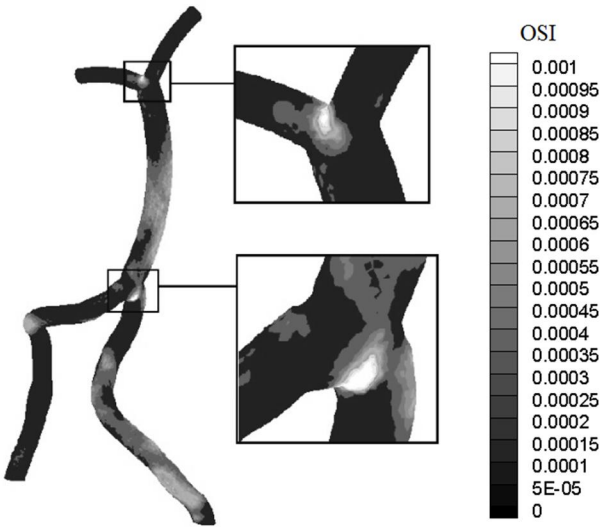

Fig. 12 Oscillatory shear index in vertebrobasilar system for a 20 year old man

شکل 12 توزیع برش نوسانی در سیستم ورتبروبازیلار فرد 20 ساله

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.4.25.4]

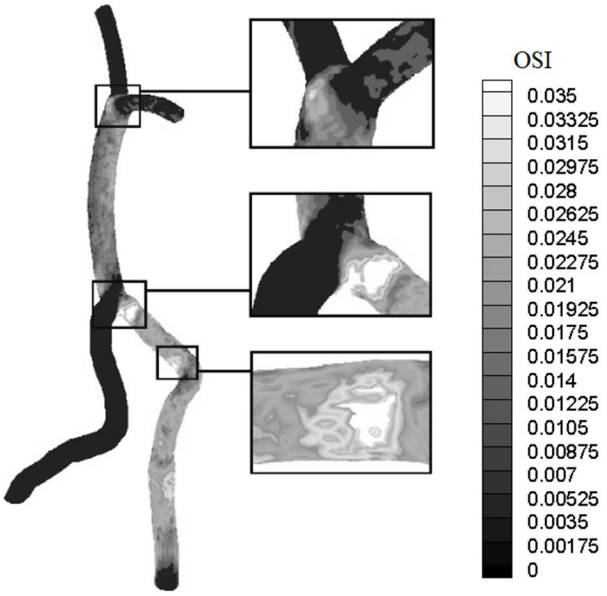

Fig. 13 Oscillatory shear index in vertebrobasilar system for a 50 year old man

شکل 13 توزیع برش نوسانی در سیستم ورتبروبازیلار فرد 50 ساله

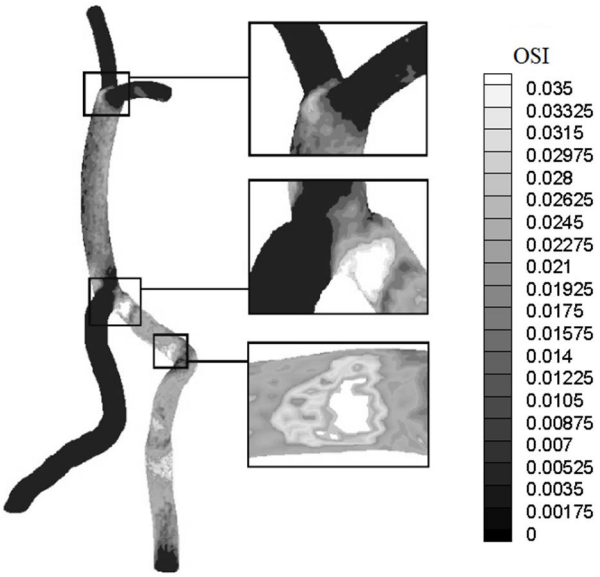

Fig. 14 Oscillatory shear index in vertebrobasilar system for a 70 year old man

شکل 14 توزیع برش نوسانی در سیستم ورتبروبازیلار فرد 70 ساله

با مشاهده شکل 14 که توزیع شاخص برش نوسانی در سیستم ورتبروبازیلار فرد 70 ساله است، می‌توان دریافت محل اتصال شریان‌های ورتبرال چپ و راست به شریان بازیلار همانند سن 50 سالگی دارای احتمال بالایی در گرفتگی است، ناحیه‌ای از شریان ورتبرال راست نیز که نزدیکی محل اتصال عروق ورتبرال واقع شده است، امکان وقوع گرفتگی وجود دارد. علاوه بر ناحیه‌های ذکر شده، در ناحیه‌ای بر روی شریان ورتبرال راست که در نزدیکی ورودی جریان خون بر روی ساق این شریان قرار دارد احتمال گرفتگی مشهود است.

با مقایسه شکل 13 و شکل 14 می‌توان دریافت که در محل اتصال عروق ورتبرال در یک فرد 50 ساله، تمرکز برش نوسانی بحرانی بیشتر بر روی ناحیه اتصال دو شریان ورتبرال راست و ورتبرال چپ می‌باشد که البته مقداری از شریان ورتبرال راست را نیز فرا گرفته است. اما در فرد 70 ساله ناحیه مستعد گرفتگی به سمت شریان ورتبرال راست پیشروی کرده و از تمرکز بر روی محل اتصال عروق ورتبرال کاسته است. در محل اتصال عروق خلفی که در سن 50 سالگی دارای احتمال پایینی برای گرفتگی بود حال در سن 70 سالگی به طور کلی این احتمال از بین رفته است و مستعد گرفتگی نمی‌باشد. در ناحیه‌ای دیگر در شریان ورتبرال راست که نزدیک به شریان بازیلار واقع شده است، ناحیه خطرناک توسعه قابل توجه‌ای نسبت به فرد 50 ساله پیدا کرده و احتمال وقوع گرفتگی را افزایش داده است.

5- نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر بر روی سیستم ورتبروبازیلار افراد با سنین 20، 50 و 70، نتایج زیر را در بر داشت:

در سن 20 سالگی تنها مکانی که دارای احتمال گرفتگی است، محل اتصال دو شریان ورتبرال می‌باشد که البته احتمال وقوع گرفتگی بسیار پایین می‌باشد و سایر مناطق نیز مستعد گرفتگی نمی‌باشند.

با افزایش عمر از 20 سال به 50 سال قطر عروق به‌طور کلی افزایش یافته و انحنای شریان بازیلار نیز ازدیاد می‌یابد، هم‌چنین دیده می‌شود که سرعت حداکثر خون به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد، بر اساس معیار شاخص نوسانی میزان احتمال وقوع گرفتگی به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش پیدا می‌کند؛ به‌طوری‌که در محل اتصال دو شریان ورتبرال در سن 20 سالگی احتمال گرفتگی چندان بالا نیست (اگرچه معیار تنش برشی میانگین اطراف محل اتصال عروق ورتبرال به شریان بازیلار در سن 20 سالگی را مستعد گرفتگی نشان می‌دهد) اما در در سن 50 سالگی مناطق مستعد گرفتگی گسترش یافته و بخشی از شریان ورتبرال راست را نیز در بر گرفته است، در محل اتصال دو شریان خلفی در سن 50 سالگی اگرچه تنش برشی میانگین دیواره به مقدار بحرانی رسیده است اما شاخص برش نوسانی این ناحیه را چندان مستعد گرفتگی نشان نمی‌دهد. بنابراین نمی‌توان این ناحیه را مستعد وقوع گرفتگی دانست.

با افزایش عمر از 50 سال به 70 سال پروفیل سرعت در شریان بازیلار چندان تغییر نمی‌کند و تنها مقدار اندکی کاهش سرعت حداکثر دیده می‌شود اما با این وجود میزان حجم خون ورودی به عروق در سن 70 سالگی افزایش پیدا می‌کند. برخلاف زمانی که عمر از 20 سال به 50 سال افزایش پیدا کرده و احتمال گرفتگی نیز به شدت بالا می‌رود، با افزایش سن از 50 سال به 70 سال تعداد نواحی مستعد گرفتگی افزایش نمی‌یابد و تنها در محل اتصال عروق ورتبرال در سن 70 سالگی، ناحیه مستعد گرفتگی به سمت شریان ورتبرال راست پیشروی می‌کند و بر احتمال وقوع گرفتگی می‌افزاید. هم‌چنین در ناحیه‌ای در شریان ورتبرال راست که بر روی ساق این شریان می‌باشد احتمال گرفتگی در سن 70 سالگی نسبت به 50 سالگی افزایش پیدا کرده است، این در حالی است که در سن 20 سالگی این ناحیه دارای شاخص برشی بسیار پایینی بوده است.

به طور کلی با افزایش سن احتمال گرفتگی در سیستم ورتبروبازیلار نیز افزایش قابل توجه‌ای پیدا می‌کند، به‌طوری‌که سن 70 سالگی محتمل‌ترین دوره زمانی برای گرفتگی در سیستم ورتبروبازیلار بخصوص در ناحیه اتصال عروق ورتبرال به شریان بازیلار و ناحیه‌هایی در شریان ورتبرال راست می‌باشد.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.4.25.4]

نتایج بدست آمده از مطالعه حاضر این امکان را به پزشکان می‌دهد که با توجه به سن افراد و پیش از انجام آزمایشات تخصصی بتوانند مکان احتمالی گرفتگی را در سیستم ورتبروبازیلار پیش‌بینی نمایند.

6- فهرست علایم

l	فاصله نقطه اتصال و جدایی(m)
P	فشار ($kgm^{-1}s^{-2}$)
t	زمان (s)
V	سرعت (ms^{-1})

علائم یونانی

μ	لزجت دینامیکی ($kgm^{-1}s^{-1}$)
μ_0	لزجت پایین ($kgm^{-1}s^{-1}$)
μ_∞	لزجت بالا ($kgm^{-1}s^{-1}$)
ρ	چگالی (kgm^{-3})
φ	زاویه اتصال
ω	زاویه جدایی

7- مراجع

[1] *What Is Atherosclerosis?*, Accessed on 21 January 2016; http://www.webmd.com/heart-disease/what-is-atherosclerosis.

[2] D. C. Shin, H. J. Seol, S. K. Kim, K. C. Wang, B. K. Cho, E. B. Shim, Computational analysis of the hemodynamics in cerebral arteries related to Moyamoya disease, *World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering 2006*, Seoul, Korea, August 27September , 2007.

[3] C. G. Caro, J. M. Fitz-Gerald, R. C. Schroter, Atheroma and arterial wall shear observation, correlation and proposal of a shear dependent mass transfer mechanism for atherogenesis, *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, Vol. 177, No. 1046, pp. 109-133, 1971.

[4] D. N. Ku, D. P. Giddens, C. K. Zarins, S. Glagov, Pulsatile flow and atherosclerosis in the human carotid bifurcation. Positive correlation between plaque location and low oscillating shear stress, *Arteriosclerosis, thrombosis, and vascular biology*, Vol. 5, No. 3, pp. 293-302, 1985.

[5] Z. Lou, W. J. Yang, Biofluid dynamics at arterial bifurcations, *Critical reviews in biomedical engineering*, Vol. 19, No. 6, pp. 455-493, 1991.

[6] J. Knight, U. Olgac, S. C. Saur, D. Poulikakos, W. Marshall, P. C. Cattin, H. Alkadhi, V. Kurtcuoglu, Choosing the optimal wall shear parameter for the prediction of plaque location—a patient-specific computational study in human right coronary arteries, *Atherosclerosis*, Vol. 211, No. 2, pp. 445-450, 2010.

[7] F. Rikhtegar, J. A. Knight, U. Olgac, S. C. Saur, D. Poulikakos, W. Marshall, P. C. Cattin, H. Alkadhi, V. Kurtcuoglu, Choosing the optimal wall shear parameter for the prediction of plaque location—A patient-specific computational study in human left coronary arteries, *Atherosclerosis*, Vol. 221, No. 2, pp. 432-437, 2012.

[8] C. Zhang, S. Xie, S. Li, F. Pu, X. Deng, Y. Fan, D. Li, Flow patterns and wall shear stress distribution in human internal carotid arteries: the geometric effect on the risk for stenosis, *Journal of biomechanics*, Vol. 45, No. 1, pp. 83-89, 2012.

[9] K. Fujii, D. D. Heistand, F. M. Faraci, Role of the basilar artery in regulation of blood flow to the brain stem in rats, *Stroke*, Vol. 22, No. 6, pp. 763-767, 1991.

[10] A. A. Valencia, A. M. Guzmán, E. A. Finol, C. H. Amon, Blood flow dynamics in saccular aneurysm models of the basilar artery, *Journal of biomechanical engineering*, Vol. 128, No. 4, pp. 516-526, 2006.

[11] A. K. Wake-Buck, J. C. Gatenby, J. C. Gore, Hemodynamic characteristics of the vertebrobasilar system analyzed using MRI-based models, *Plos One*, Vol. 7, No. 12, pp. e51346, 2012.

[12] S. H. Lee, N. Hur, S. K. Jeong, Geometric analysis and blood flow simulation of basilar artery, *Journal of atherosclerosis and thrombosis*, Vol. 19, No. 4, pp. 397-401, 2012.

[13] M. D. Bockman, A. P. Kansagra, S. C. Shadden, E. C. Wong, A. L. Marsden, Fluid mechanics of mixing in the vertebrobasilar system: comparison of simulation and MRI, *Cardiovascular Engineering and Technology*, Vol. 3, No. 4, pp. 450-461, 2012.

[14] S. S. Shibeshi, W. E. Collins, The rheology of blood flow in a branched arterial system, *Applied rheology (Lappersdorf, Germany: Online)*, Vol. 15, No. 6, pp. 398, 2005.

[15] S. K. Jeong, J. H. Lee, D. H. Nam, J. T. Kim, Y. S. Ha, S. Y. Oh, S. H. Park, S. H. Lee, N. Hur, H. S. Kwak, G. H. Chung, Basilar artery angulation in association with aging and pontine lacunar infarction: a multicenter observational study, *Journal of atherosclerosis and thrombosis*, Vol. 22, No. 5, pp. 509-517 , 2015.

[16] P. Scheel, C. Ruge, M. Schöning, Flow velocity and flow volume measurements in the extracranial carotid and vertebral arteries in healthy adults: reference data and the effects of age, *Ultrasound in medicine & biology*, Vol. 26, No. 8, pp. 1261-1266, 2000.

[17] O. Kizilkilic, C. Hurcan, I. Mihmanli, L. Oguzkurt, T. Yildirim, F. Tercan, Color Doppler analysis of vertebral arteries correlative study with angiographic data, *Journal of ultrasound in medicine*, Vol. 23, No. 11, pp. 1483-1491, 2004.

[18] J. D. Rawal, H. R. Jadav, Histomorphometric comparison of diameter of right and left vertebral arteries, *National Journal of Medical Research*, Vol. 2, No. 3, pp. 260-263, 2012.

[19] K. Devault, P. A. Gremaud, V. Novak, M. S. Olufsen, G. Vernieres, P. Zhao, Blood flow in the circle of Willis: modeling and calibration, *Multiscale Modeling & Simulation*, Vol. 7, No. 2, pp. 888-909, 2008.

[20] A. Sharifi, H. Niazmand, Analysis of flow and LDL concentration polarization in siphon of internal carotid artery: Non-Newtonian effects, *Computers in biology and medicine*, Vol. 65,No.1, pp. 93-102, 2015.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.4.25.4]