



Kan Viskozitesinin Stenozlu Bir Damar Çeperinde Basınç ve Kayma Gerilmesine Etkisi Effect of Blood Viscosity on Pressure and Shear Stress on the Walls of an Artery with Stenosis

Daver ALİ

Tıp Mühendisliği Bölümü
Karabük Üniversitesi
Karabük, Türkiye
daverali@karabuk.edu.tr

Selis ÖNEL

Kimya Mühendisliği Bölümü
Hacettepe Üniversitesi
Ankara, Türkiye
selis@hacettepe.edu.tr

Özetçe: Stenoz oluşan damarlarda kan akış dinamikleri kritik bir konudur. Bu çalışmada kan viskozitesinin, kesit alanı %70 oranında daralmış bir damarın çeperlerinde meydana gelen basınç ve çeper kayma gerilmesi üzerine etkisi hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanarak incelenmiştir. Kan viskozitesindeki artışın, normal ve stenozlu damarların çeperlerinde basınç ve kayma gerilmesinin artmasına sebep olduğu görülmüştür. Bu parametrelerin, normal damarda kan viskozitesinin artmasıyla doğrusal olarak arttığı, stenozlu damarda ise damar boyunca farklı bölgelerde doğrusal olmayan şekilde etkilendiği ortaya çıkmıştır.

Anahtar Kelimeler: Çeper kayma gerilmesi, Stenozlu damar, Kan viskozitesi, CFD Analizi

Abstract: Blood flow dynamics in arteries with stenosis is a critical issue. In this study, the effect of blood viscosity on the pressure and wall shear stress that form on the walls of an artery with a 70% reduced cross-sectional area was investigated using computational fluid dynamics. It was observed that the increase in blood viscosity caused an increase in the pressure and shear stress on the walls of normal arteries and those with stenosis. It has been shown that these parameters increase linearly with increasing blood viscosity in a normal artery and behave nonlinearly along the different regions of an artery with stenosis.

Keywords: Wall shear stress, Stenosis artery, Blood viscosity, CFD Analysis

1. Giriş

Gelişmiş ülkelerde kardiyovasküler hastalıklar ölümlerin önde gelen nedenlerinden biridir. Kan akışındaki bozukluk çoğunlukla damarlardaki daralmayla (stenoz) ilişkilidir.

Stenozlu damarın kesit alanının normal damara göre daha küçük olması sebebiyle kan akışının azalması ciddi sağlık problemlerine yol açabilir. Örneğin, beyin gibi hassas bölgelerde kan akışının azalması yüksek felç riski yaratır ve hatta ölüme neden olabilir. Bu nedenle, son yıllarda, stenozlu damarlarda kan akışının incelenmesi önem kazanmıştır [1].

Akışkanlar mekaniği açısından damar çeperleri, kan ve çeper arası sürtünme ve kan basıncından kaynaklanan iki farklı yüke maruz kalır. Kan akışı, teğetsel doğrultuda çeper kayma gerilmesine (ÇKG) sebep olurken, kan basıncı damar çeperine dik yönde bir hidrostatik kuvvet uygular. Çeper kayma gerilimi, kan akışı sırasında damar duvarının sıvı (kan) üzerinde birim alanda uyguladığı teğet kuvveti ifade eder.

Atardamarlarda kan akışında meydana gelen herhangi bir azalma veya çoğalma, kılcal damarlardaki akışı etkileyebilir. Mesela, kılcal damarlarda kan akış hızının azalmasının retinanın kalınlaşmasına ve uzun vadede dejenerasyonuna sebep olduğu bilinmektedir [2]. Ateroskleroz damar hastalığında ÇKG değişiminin önemli rol oynadığına yönelik birçok teori bulunmaktadır [3]. Dolayısıyla, damarlarda kan akışının incelenmesi kalp ve damar hastalıkları ve bunların sebep olduğu diğer hastalıkların kontrolü açısından önemlidir.

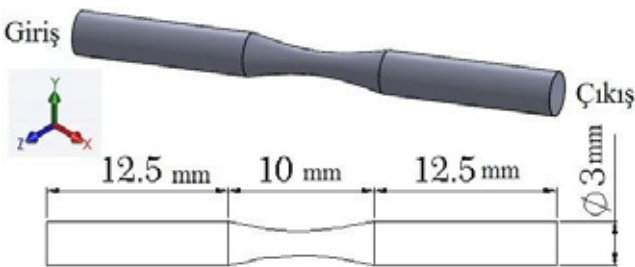
Kan akış dinamiğini gözlemlemek için klinik işlemler ve araştırma amaçlı çalışmalarda genel olarak manyetik rezonans görüntüleme veya Doppler ultrason teknikleri kullanılmaktadır. Son yıllarda, kan akışı analizinde matematiksel modeller ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) yöntemleri etkin şekilde kullanılmaya başlamıştır [4, 5].

Kan sıvı bir malzeme olduğu için akış dinamiği viskozitesine bağlıdır. Kanın viskozitesini sigara kullanımı, şeker hastalığı gibi birçok faktör etkileyebilmektedir [6, 7]. Damarlarda stenoz oluşmuş ise kan akışı normal damarlardan oldukça farklıdır [8, 9]; ancak kan viskozitesinin stenozlu damar çeperlerinde oluşan basınç ve ÇKG üzerinde etkisini gösteren yeterli çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmada, kan viskozitesinin, kesit alanı %70 oranında daralan bir damarın çeperlerinde meydana gelen basınç ve ÇKG değerleri ve damar boyunca dağılımları üzerine etkisi CFD yöntemiyle incelenmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. DAMAR GEOMETRİSİ

CFD analizlerde damarların kısmi tıkanmasını modellemek için farklı geometriler (üçgen, ikizkenar yamuk ve elips) kullanılmaktadır [10]. Bu çalışmada 3 mm çapa sahip olan bir damarın eksenle simetrik olarak kesit alanında %70 oranında daralma SolidWorks yazılımı ile elips geometrisi kullanılarak modellenmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. 35 mm uzunlukta kesiti alınan stenozlu damarda 10 mm uzunlukta daralan kısım geometrisi.

2.2. DENKLEMLER VE SINIR ŞARTLARI

Kan, genel olarak Newton tipi olmayan akışkan olarak tanımlanmaktadır; ancak kayma hız oranının belli bir seviyeye yükselmesinden sonra viskozitesi azalarak sabit bir değere ulaşabilir ve Newton tipi davranış gösterebilir. Bu çalışmada

kanın damara giriş hızı 0.2717 ms^{-1} (pik sistolik akış hızı) olarak seçilmiştir [9]. Çalışmadaki damarın çapına bağlı olarak kayma hız oranı 181.1 s^{-1} olarak elde edilmiştir ve böyle bir kayma hız oranı kanın Newton tipi akışkan kabul edilebilir olduğunu göstermektedir [11].

Sıkıştırılmaz akışkan bir sistem için Navier–Stokes denklemi kullanılmıştır [5, 12, 13]:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} - \mu \nabla^2 u + \rho(u \cdot \nabla)u + \nabla p = F, \quad \nabla \cdot u = 0 \quad (1)$$

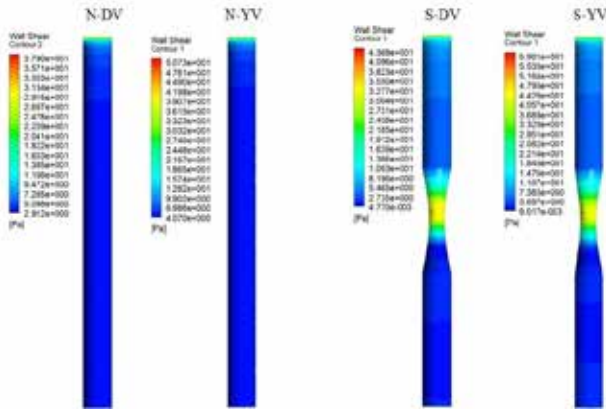
Burada ρ akışkan yoğunluğunu (kg/m^3), u akış hızını (m/s), μ akışkanın dinamik viskozitesini (Pa. s), ∇ del işlemcisini, p basıncı (Pa) ve F diğer kuvvetleri (yerçekimi, merkezkaç kuvveti, vb.) göstermektedir ($F = 0$).

Kanın özgül ağırlığı için 1050 kg/m^3 ve viskozitesi için $0.00398 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ve $0.00562 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ (düşük ve yüksek) olarak iki farklı değer kullanılmıştır [7]. Damar çeperlerinde kaymama (no slip) koşulu ve damar çıkış basıncı sıfır olarak uygulanmıştır [10]. Stenozlu ve normal damar geometrileri için düşük ve yüksek iki farklı viskozite tanımlanarak toplam dört çalışma modeli oluşturulmuştur. Modeller geometrileri ve uygulanan viskozite değerine bağlı olarak adlandırılmıştır. N-DV, N-YV, S-DV ve S-YV kısaltmaları sırasıyla normal- damar düşük viskozite, normal-damar yüksek viskozite, stenozlu-damar düşük viskozite ve stenozlu-damar yüksek viskozite modellerini ifade etmektedir. Çözümler Ansys Fluent yazılımı kullanılarak yapılmıştır. CFD analizleri basınca dayalı akışla ve tam gelişmiş bir akım sistemiyle gerçekleştirilmiştir. Reynolds sayısı düşük ve yüksek viskozite modelleri için sırasıyla 215 ve 153 olarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla, CFD analizler laminar akış rejiminde yapılmıştır. CFD modellerde ağ örgüsü 10- μm ’luk dört yüzeysel tetrahedral elemanlar kullanarak elde edilmiştir ve yakınsama kriteri olarak kullanılan mutlak hata $1e-05$ olarak seçilmiştir. Normal ve stenozlu damar geometrileri için ağ eleman sayısı sırasıyla 241807 ve 268691 olarak hesaplanmıştır.

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

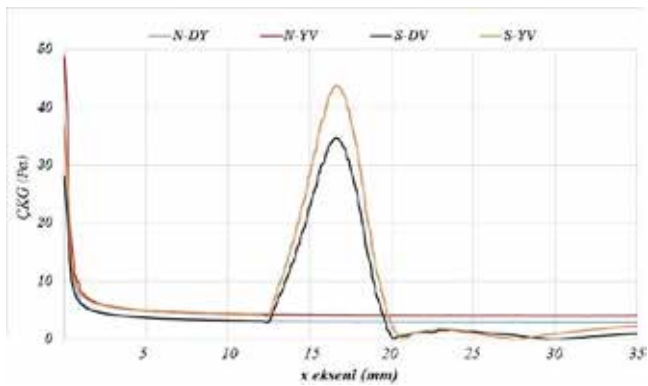
Yüksek kan viskozitesinin hem normal hem de stenozlu damarlarda oluşan ÇKG’nin artmasına sebep olduğu görülmüştür (Şekil 2). Stenozlu damarda en yüksek ÇKG

değerleri stenozun bulunduğu bölgede ve seçilen model koşullarına bağlı olarak damar girişinde elde edilmiştir.



Şekil 2. Normal ve stenozlu damarlarda çeper kayma gerilmesi (ÇKG) dağılımının kontur grafiği olarak gösterimi.

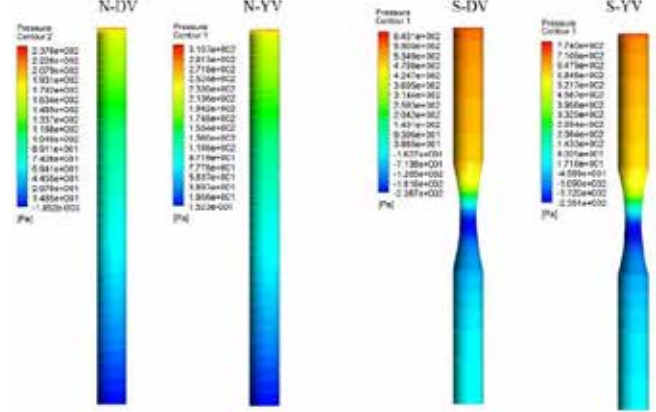
Damar boyunca ÇKG dağılımı Şekil 3'te daha somut olarak görülmektedir.



Şekil 3. Normal ve stenozlu damarlarda damar boyunca ÇKG dağılımı.

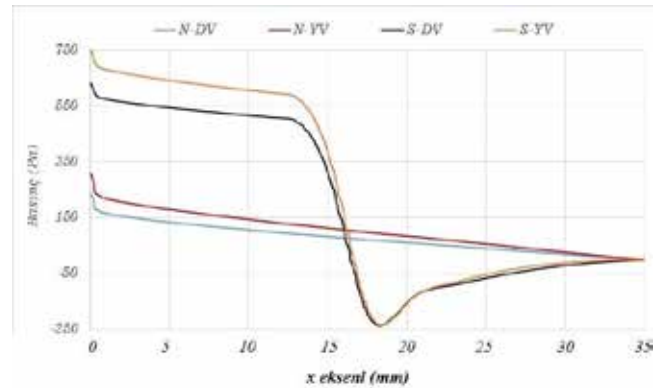
Şekil 3'te görüldüğü gibi ÇKG normal damarda hem düşük hem de yüksek kan viskozite değerleri için girişten çıkışa doğru azalarak damar boyunca sabit eğilim göstermektedir. Stenozlu damar boyunca ÇKG dağılımı ise stenozlu bölge öncesinde normal damarla aynı eğilim gösterirken, stenozlu bölgede geometriye bağlı ani bir yükselme göstermiş ve stenozlu bölge sonrası normal damara göre daha düşük değerlere ulaşmıştır. Stenozlu damarda, kan viskozitesinin ÇKG üzerindeki etkisi damarın en dar bölgesinde diğer bölgelere göre daha belirgindir. Bunun sebebi bu bölgede kesit alanının küçülmesinden kaynaklı olarak kan akış hızının artmasıdır.

Hem normal hem de stenozlu damarlarda yüksek kan viskozite çeperlerinde daha yüksek basınç meydana getirmiştir (Şekil 4).



Şekil 4. Damar çeperlerinde meydana gelen basınç konturları.

Şekil 5'de damar boyunca basınç dağılımı tüm modeller için görülmektedir.



Şekil 5. Damar çeperleri boyunca oluşan basınç (Pa) dağılımı

Şekil 5'te görüldüğü gibi normal damarda çeperde oluşan basınç model koşullarına bağlı olarak doğrusal azalma göstermektedir. Stenozlu damarda ise basınç profili daha farklı elde edilmiştir. Damarın dar bölgesinde çeperde oluşan basınç negatiftir. Bu durum o bölgede kanın sıkışarak daha hızlı akmasına ve çeperi merkeze doğru çekmesinden kaynaklanmaktadır.

4. SONUÇ

Sonuç olarak kanın viskozite değeri hem normal hem de stenozlu damar çeperlerinde meydana gelen basınç ve çeper kayma gerilmesi dağılımını etkilemektedir. Stenozlu damarlarda daralan kısımda oluşan ÇKG değerlerinin ani



yükseliş gösterdiği ve viskozitenin artmasıyla daha da arttığı görülmüştür. Damar boyunca çeperlerde oluşan basınç ise normal damarda doğrusal değişim gösterirken stenozlu damarda inişli çıkışlı bir profil vermiştir. Stenozlu damarlarda oluşan basınç ve ÇKG değerlerinin kan viskozitesine daha hassas olduğu ortaya çıkmıştır. Çalışma sonuçları, stenozlu damarlara sahip hastalarda kan viskozitesinin sık sık kontrol edilmesinin gerekli olduğunu göstermektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Karabük Üniversitesi BAP koordinatörlüğü tarafından desteklenmiştir. Destek ve yardımlardan dolayı teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

1. Carboni, E.J., et al., *The Margination of Particles in Areas of Constricted Blood Flow*. Biophysical Journal, 2018. **114**(9): p. 2221-2230.
2. Thompson, C.S. and A.M. Hakim, *Living Beyond Our Physiological Means Small Vessel Disease of the Brain Is an Expression of a Systemic Failure in Arteriolar Function: A Unifying Hypothesis*. Stroke, 2009. **40**(5): p. E322-E330.
3. Shaaban, A.M. and A.J. Duerinckx, *Wall shear stress and early atherosclerosis: A review*. American Journal of Roentgenology, 2000. **174**(6): p. 1657-1665.
4. Rispoli, V.C., et al., *Computational fluid dynamics simulations of blood flow regularized by 3D phase contrast MRI*. Biomedical Engineering Online, 2015. **14**.
5. Ali, D. and S. Sen, *Permeability and fluid flow-induced wall shear stress of bone tissue scaffolds: Computational fluid dynamic analysis using Newtonian and non-Newtonian blood flow models*. Computers in Biology and Medicine, 2018. **99**: p. 201-208.
6. Cakmak, G., et al., *Blood viscosity as a forgotten factor and its effect on pulmonary flow*. Translational Respiratory Medicine, 2013. **1**(1): p. 3.
7. Irace, C., et al., *Blood Viscosity in Subjects With Normoglycemia and Prediabetes*. Diabetes Care, 2014. **37**(2): p. 488-492.
8. Chaichana, T., Z.H. Sun, and J. Jewkes, *Computational Fluid Dynamics Analysis of the Effect of Plaques in the Left Coronary Artery*. Computational and Mathematical Methods in Medicine, 2012: p. 9.
9. Caballero, A.D. and S. Lain, *Numerical simulation of non-Newtonian blood flow dynamics in human thoracic aorta*. Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, 2015. **18**(11): p. 1200-1216.
10. Kamangar, S., et al., *Numerical Investigation of the Effect of Stenosis Geometry on the Coronary Diagnostic Parameters*. Scientific World Journal, 2014.
11. Cherry, E.M. and J.K. Eaton, *Shear thinning effects on blood flow in straight and curved tubes*. Physics of Fluids, 2013. **25**(7).
12. Ali, D. and S. Sen, *Computational Fluid Dynamics Study of the Effects of Surface Roughness on Permeability and Fluid Flow-Induced Wall Shear Stress in Scaffolds*. Annals of Biomedical Engineering, 2018.
13. Ali, D. and S. Sen, *Finite element analysis of mechanical behavior, permeability and fluid induced wall shear stress of high porosity scaffolds with gyroid and lattice-based architectures*. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2017. **75**: p. 262-270.