ARAŞTIRMA MAKALESİ

Açık Kaynak Kodlu Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği İle Borularda Su Darbesi Analizi

Anıl İSTANBULLU
Mak. Müh.
Marmara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği
İstanbul
anil.istanbullu@gmail.com
orcid: 0009-0009-3860-1294

Emre ALPMAN
Prof. Dr.
Marmara Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
Makine Mühendisliği
İstanbul
emre.alpman@marmara.edu.tr
orcid: 0000-0002-7125-5321

ÖZ

Bu çalışma, açık kaynak kodlu bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği olan OpenFOAM yazılımı aracılığı ile borularda su darbesi analizinin gerçekleştirilmesini içermektedir. Su darbesi, sıvının hızı ve basıncındaki ani değişiklikler nedeniyle basınçtaki yükseliş olarak tanımlanır. Sıkıştırılabilir sıvılar prensiplerinin, yüksek basınç altındaki su yoğunluğunun sabit olmayacağı için dikkate alındığı vurgulanmaktadır. Analizin yapılabilmesi için, OpenFOAM içerisinde yer alan ve laminer akışlar için zamana bağlı akış çözümleyicisi olan sonicLiquidFoam kullanılmıştır. Örnek çalışma içerisinde, basınç salınımlarını görebilmek için bir boru hattındaki su darbesi durumu analiz edilmiştir. Bu çalışma sayesinde, açık kaynak kodlu hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı aracılığıyla da su darbesi analizi yapılmasının mümkün olduğu vurgulanmıştır.

Anahtar Kelimeler

Su Darbesi, Sıkıştırılabilir Sıvılar, Boru Hattı, OpenFOAM.

Water Hammer Analysis in Pipelines with Open Source CFD Software OpenFOAM

ABSTRACT

This study includes water hammer analysis inside pipelines performed by using the open source computational fluid dynamics software OpenFOAM. Water hammer is defined as the spike in pressure due to sudden changes on fluid's velocity and pressure. It is emphasized that compressible fluid principals have been taken into account since the density of water under high pressure is not going to be constant. In order to perform analysis the solver sonicLiquidFoam, which is designed for time dependent laminar flow solutions, of OpenFOAM has been utilized. In the case study, water hammer inside a pipeline has been analyzed to be able to see the pressure pulsations. Thanks to this study, it is emphasized that water hammer analysis could also be performed by means of open source computational fluid dynamics software.

Keywords

Water Hammer, Compressible Liquids, Pipeline, OpenFOAM.

Geliş Tarihi : 30.10.2018
Kabul Tarihi : 04.02.2019

İstanbullu, A., Alpman, E., Açık Kaynak Kodlu Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği İle Borularda Su Darbesi Analizi, 14. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi Bildiriler Kitabı, sf. 967-978, 17-20 Nisan 2019.

1. GİRİŞ

İnsanlar, varoluşundan beri suyu bir yerden başka bir yere taşımak zorunda kalmıştır. Yaklaşık beş bin yıldır yüzbinlerce kilometrelik boru hatlarıyla su taşınımı gerçekleştirilmiş olup, bu bağlamda günümüzdeki borulamanın önemine dikkat çekmek için hem ulusal hem de uluslararası mühendislik çalışmaları ön plana çıkmaktadır. Borulama konusunda göz önünde bulundurulması gereken önemli hususlardan biri de su darbesidir. Boru hatlarının herhangi bir noktasında oluşabilecek su darbesi etkilerinin yaratacağı maksimum ve minimum basınçların tahmin edilmesi, hattı tasarlayan mühendisin ana problemlerinden biri olduğu gibi mühendislik bilimi için de klasikleşmiş bir uğraş alanı olmuştur [1]. Su darbesi tahmini daha eski yıllarda analiz yöntemleri, grafik yöntemleri ve nümerik yöntemleriyle yapılmaktaydı. Klasik su darbesi denklemleri boyutsuz yöntemle elde edilen hiperbolik denklemlerin bir sonucudur. Fakat bu problemin analiz yöntemiyle çözümü çok karmaşıktır. Analiz yöntemi, basitleştirilmiş temel denklemleri çözmek ve yalnızca hidrolik kaybın ihmal edildiği basit boru hatlarında uygulanmak için kullanılmaktadır. Son yıllarda, su darbesi analizi nümerik yöntemler ile yaygın bir şekilde yapılmaktadır ve neredeyse grafik yönteminin yerini almıştır. Su darbesi analizi için karakteristik metodu, sonlu hacim metodu, sonlu eleman metodu, Galerkin metodu ve akışkan-katı etkileşimi gibi hesaplama yöntemleri kullanılmaktadır. Bunların arasında yer alan karakteristik metot en bilinenlerinden olup, bazı araştırmacılar tarafından bu yöntem ile elde edilen sonuçların deneysel veriler ile iyi örtüştüğü gösterilmektedir [2]. Su darbesi problemlerini çözmek için çeşitli yaklaşımlar denenmiş olup bu uğraşlar sonunda, grafiki, cebrik ve yarı analitik metotlar geliştirilerek bunlara dayanan ve mühendislerin pratik olarak kullanabileceği olanaklar hazırlanmıştır. Bu metotlara istinaden geliştirilen bilgisayar yazılımları desteğiyle boru hattındaki istenen noktadaki basıncın hesaplanması mümkün kılmıştır [3].

Birçok araştırmacı düz boru hatlarında su darbesi çalışmaları için kullandığı teorik yöntemler ile birlikte deneysel yöntemleri de kullanmaktadır. Deneysel çalışmalar için, Holmboe [4] tarafından süreksiz laminer akışlardaki basınç değişimlerini ölçen ve sonuçlarını Joukowsky [5] sürtünmesiz analizi ile karşılaştırmasını örnek olarak verilebilir. Ölçümlerde, vizkoz olmayan akışları kapsayan teorik çözümlerin su gibi düşük vizkoz özelliklere sahip akışkanların kullanılması durumunda da geçerli olduğu gösterilmiştir. Bergant [6] ani vana kapanmalarından dolayı oluşan basınç değişimlerini laminer ve düşük Reynold sayısına sahip türbülanslı akışlar için ölçmüştür. Safwat [7] ani vana kapanlarından dolayı borunun et kalınlığında oluşan gerilmeleri, su darbesi esnasındaki elastik hareketlerini değerlendirmek için ölçmüştür. Boru et kalınlığının dış tarafındaki gerilme ölçümünün, borudaki geçici basınç değişikliklerinden dolaylı olarak oluşabileceği sonucuna varmışlardır. Brunone [8] ise su darbesinden dolayı oluşan basınç ve hız profillerini ölçmüş ve bir boyutlu analiz sonuçlarıyla basınç değişimlerini karşılaştırmıştır.

Analitik çalışmalar dikkate alındığında, su darbesinin temel denklemi olarak bilinen ve Joukowsky [5] tarafından piyezometrik yükseklik için önerilen aşağıdaki denkleme göz atabiliriz.

$$\Delta H = \pm a\Delta u / g \qquad (1)$$

Burada verilen a, H ve u sırasıyla dalga hızı, piyezometrik yükseklik ve ortalama hız olarak tanımlanmaktadır. Ghidaoui ve Kolyshkin [9] tarafından su darbesi esnasında oluşan hem süreksiz laminer ve hem de türbülanslı akışlardaki hız profilleri için doğrusal kararlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma sayesinde ise akış kararsızlığının sebepleri olarak; hız profillerindeki dönüm noktalarının ve boru duvarı yakınındaki büyük basınç değişimlerinin varlığı gösterilmiştir.

Su darbesi modellemelerinin önemli konularından birisi sürtünme modelleme tahminlerinin süreksiz bir akış için uygulanması olup hem deneysel hem de teorik analiz çalışmaları gerçekleştirilmektedir. Bir boyutlu su darbesi analizi için önerilen modeller arasında, türbülanslı boru akışındaki basınç kayıpları için geliştirilen Darcy-Weisbach kayma gerilmesi en bilinen modeldir. Bu model sabit eksenel ortalama hıza dayalıdır fakat sürekli olmayan şartlar için geçerlidir [10].

Karakteristik metod, nümerik olarak verimliliğinden ve karmaşık sınır koşullarının da üstesinden gelebilme özelliğinden dolayı su darbesi analizlerinde en çok tercih edilen yöntemdir. Chaudhry [11] ve Wylie [12] tarafından öne atılmıştır. Bu yöntemdeki ana denklemler, boru içerisindeki kütlenin korunumu ve momentumun korunumu yasalarından

elde edilen zamana bağlı kısmi türevli diferansiyel denklemlerdir. İkinci denklem süreklilik denklemi olup, üçüncü denklem ise hareket denklemidir [3].

$$\frac{a^2}{g}\frac{\partial \mathrm{V}}{\partial \mathrm{x}} + V\frac{\partial \mathrm{H}}{\partial \mathrm{x}} + \frac{\partial \mathrm{H}}{\partial \mathrm{t}} + V\sin\theta = 0 \quad (2)$$

$$g\frac{\partial \mathrm{H}}{\partial \mathrm{x}} + V\frac{\partial \mathrm{V}}{\partial \mathrm{x}} + \frac{\partial \mathrm{V}}{\partial \mathrm{t}} + \frac{\mathrm{f}V|V|}{2D} = 0 \quad (3)$$

Denklem 2'deki süreklilik denkleminde yer alan a değeri sesin su içerisindeki yayılma hızını göstermekte olup Denklem 4'te gösterildiği gibi hesaplanır.

$$a = \sqrt{\frac{\frac{K}{\rho}}{1 + \frac{K}{E}\frac{D}{e}C}} \quad (4)$$

Buradaki K akışkanın hacimsel sıkışma modülünü, ρ akışkanın yoğunluğunu, E borunun elastisite modülünü, D borunun çapını ve e ise borunun et kalınlığını temsil eder. Buradaki C ise borunun bağlantı tipine göre değişen bir boyutsuz katsayı olarak bilinmektedir. Ana denklemlerin çözümü için başlangıç ve sınır koşullarının bilinmesi gereklidir.

Tijsseling tarafından gösterildiği gibi [13] karakteristik metodu, genellikle ilk basınç yükselmelerinde oluşan sistemlerdeki maksimum basınç tahminini doğru bir şekilde vermektedir. Bu metod dalga artışının ve bastırılmasının öngörülmesinde başarısız olmasına rağmen dalga periyotlarını doğru bir şekilde tahmin eder. Chaudhry ve Hussanini [14] su darbesi denklemlerini çözmek için MacCormack, Lambda ve Gabutti açık sonlu fark yöntemlerini kullanmaktadır. Çalışmalarında, ikinci dereceden sonlu fark yönteminin (zamanda ve uzayda) birinci dereceden karakteristik metoduna göre daha doğru sonuçlar verdiğini göstermektedirler.

Bu çalışmada, farklı ağ yapılarındaki aynı boru hatları için belirli sınır koşulları altında oluşan su darbesi durumları ele alınmış olup, sonuçları için grafik görselleri oluşturulmuştur. Bu bağlamda, açık kaynak kodlu bir program olan OpenFOAM ve içerisinde yer alan laminer akışlar için geçerli olacak şekilde zamana bağlı akış çözümleyicisi olan sonicLiquidFoam sayesinde boru hatlarında meydana gelen su darbesi analiz edilmiştir ve sonuçları incelenmiştir.

2. ÇALIŞMA METODU

2.1. Teorik Hesaplamalar

Anlatıldığı gibi akışkanın momentumundanki ani değişimler, su darbesine sebep olmaktadır. Bu durum, Newton'un ikinci yasası kullanılarak formüle edilebilir [15].

$$\frac{dp}{dt} = \rho a \frac{dv}{dt} \quad (5)$$

Denklem 5 ile verilen formülasyon Joukowsky denklemi olarak bilinmektedir [15]. Buradaki parametreler, basınç p, akışkanın yoğunluğu ρ, akışkanın hızı v ve sesin su akışkan içindeki yayılma hızı a ile ifade edilmiştir. Ses hızı daha açık bir ifade ile şu şekilde elde edilebilmektedir.

$$a = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (6)$$

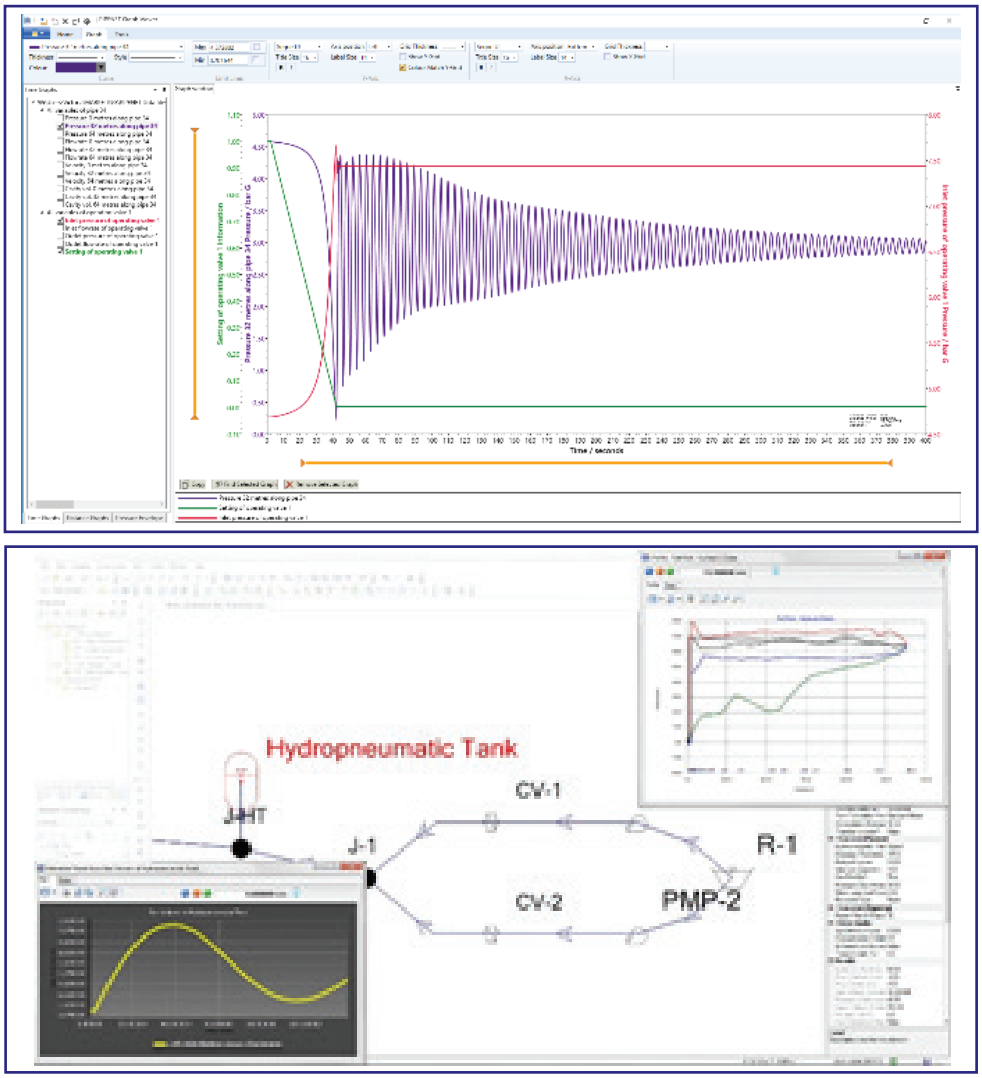
Burada, akışkanın sıkıştırılabilmesi ile ilişkilendirilebilen bir parametre olan sıkıştırılabilirlik katsayısı olan K verilmiştir. K değeri aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$K = \rho\frac{dp}{d\rho} \quad (7)$$

Sıkıştırılabilirlik katsayısı elde edildiğinde, akışkan içerisindeki ses hızının yayılması öngörülebilir. Bu sayede, Joukowsky denklemlerinde kullanılarak basınç değişimleri hesaplanabilmektedir. Bir sonraki konu başlıklarında, borularda su darbesi ve sonucunda oluşan basınç değişimleri ele alınacaktır.

2.2. HAD ile Su Darbesi Analizleri

Hem özel hem de kamu kuruluşları, ele aldıkları borulama projeleri için ihtiyaç duydukları hesaplama modüllerine bağlı olarak, su darbesi analizi gerçekleştirmek amacıyla ücretli yazılımlar tercih edebilmektedirler. Böyle bir ihtiyacın olduğu ortamda ise birçok yazılım firması, kullanıcıya açık olmayan kodlar ile oluşturdukları mühendislik programlarını bu gibi kurum / kuruluşlara tedarik etmektedirler. Bu programlardan bazılarına dair ekran görüntüleri aşağıdaki gibi gösterilmiştir.



Şekil 1. Su darbesi analizi yapabilen programlara dair ekran görüntüsü – PIPENET ve BENTLEY [16]

2.3. SonicLiquidFoam

OpenFOAM içerisinde olan hesaplamalı akışkanlar dinamiği çözücüsü olan sonicLiquidFoam ile su darbesi hesaplamaları gerçekleştirilebilmektedir. Tanım olarak sonicLiquidFoam, sıkıştırılabilir sıvıların laminer akışları için olan zamana bağlı bir çözücü olarak bilinir. Bu çözücü, PIMPLE olarak adlandırılan algoritma mantığı ile çalışmaktadır [17]. Bu algoritmayı ilgili çözücü içerisinde kullanarak istenilen düzeltme faktörlerine göre zamana bağlı denklemlerin çözümlenmesi sağlanmaktadır. Su darbesi durumunda, akışkanın durumu kararsızdır yani bir başka deyişle akışkanın içerisinde meydana gelen basınç değişimleri her birim zaman için farklılık göstermektedir. Bu basınç farklılıkları ya da dağılımları belirli bir süre içerisinde normale dönerek, başta kararsız olan sistemin yapısı kararlı hale dönmektedir.

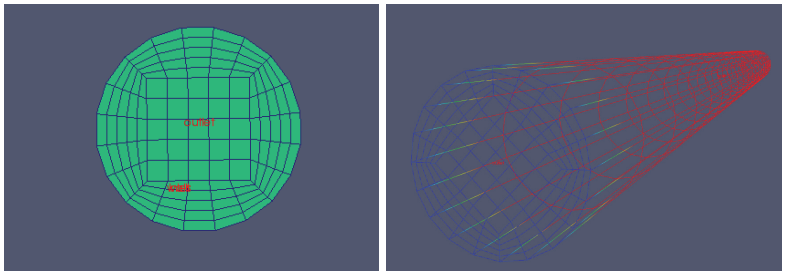
1. Belirli bir zaman adımı için hesaplama başlatılır.
2. Süreklilik denklemi çözülür.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \qquad (8)$$

3. PIMPLE algoritmasına başlanarak aşağıdaki momentum denklemi çözülür.

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) - \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right) = \frac{\partial p}{\partial x_i} \qquad (9)$$

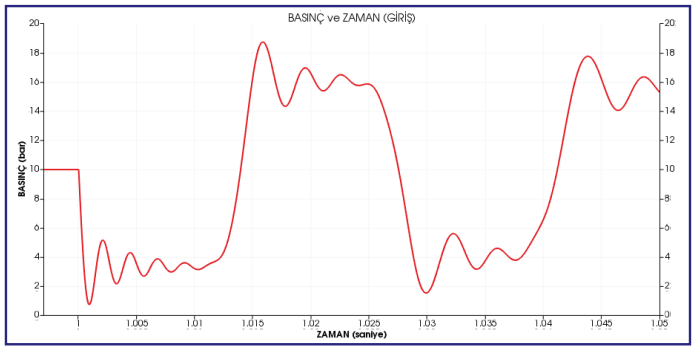
4. Basınç düzelticileri döngüye dahil edilip, kullanıcı tarafından belirtilen düzeltme sayısına göre bu düzelticilerin tekrar edilmesi sağlanır.



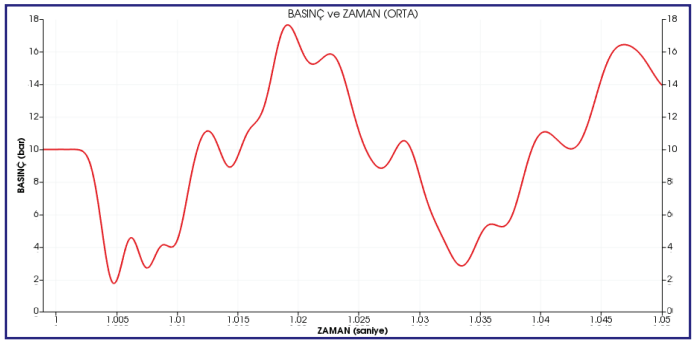
Şekil 2. Analizi yapılacak olan boruya ait ağ yapısı

Tablo 1. Analize Dair Sınır Koşulları

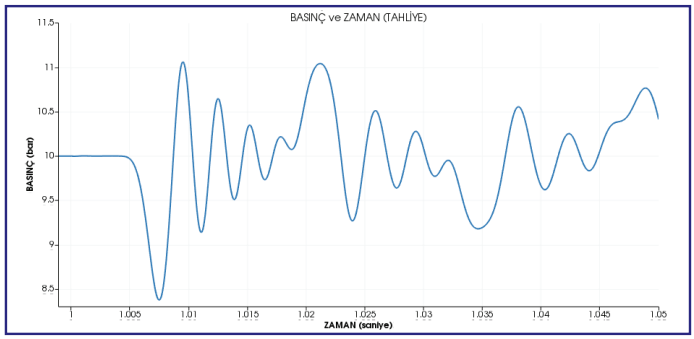
Model unsuru	Sınır koşulları ve işlemler	Sınır koşullarına ait sayısal değerler
Boru giriş	İç basıncın sabit bir şekilde kalmasını sağlayacak sürekli basınç tanımlaması – statik basınç	10e+6 Pascal (10 Bar(g))
Boru çıkış	Vana (duvar tanımlaması) etkisi	0 Pascal (0 Bar(g))
Boru dış yüzey	Hız sınır tabakası	-



a. Boru giriş kısmındaki zamana bağlı basınç eğrisi



b. Borunun orta kısmındaki zamana bağlı basınç eğrisi



c. Boru tahliye kısmındaki zamana bağlı basınç eğrisi

Şekil 3. 5x5x18 ağ sıklığı durumu için borudaki basıç eğrileri, (a) Giriş, (b) Orta, (c) Tahliye

5. Akışkanın yoğunluğundaki değişim Denklem 10'a göre doğrusal hale getirilir.

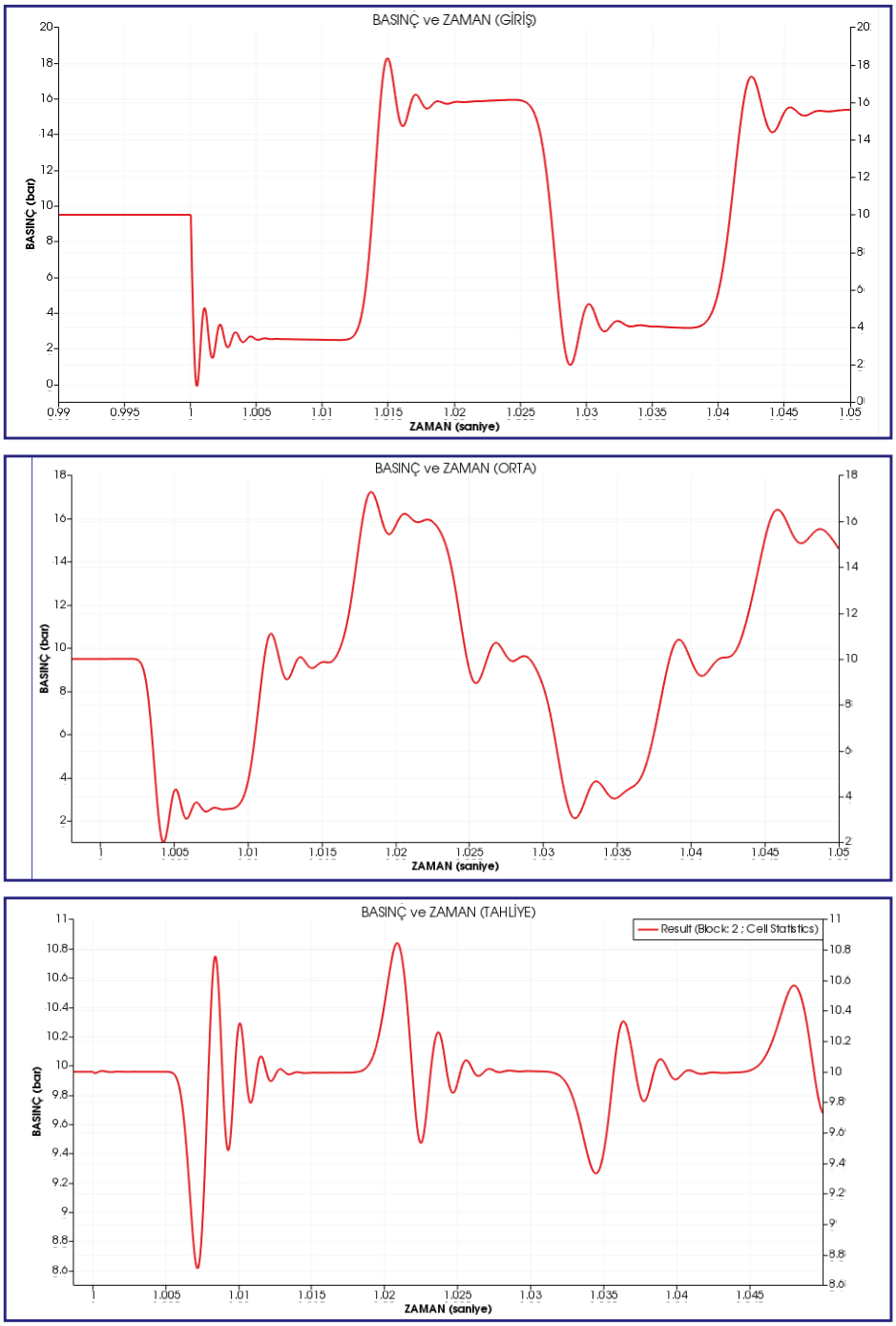
$$\rho = \rho_0 + \Psi(p - p_0) \quad (10)$$

Bu formülde verilen başlangıç basınç değeri ve başlangıç yoğunluk değerleri sırasıyla p_o ve ρ_o ile temsil edilmekte olup, bunlar sabitler olarak bilinip aynı klasör içerisinde constrant\thermodynamicProperties adlı dosya içerisinde saklanmaktadır.

6. Bir sonraki zaman adımına geçiş için ilerlenir.

Ψ büyüklüğü ve Ψ= ρ/p değeri bağıntısına bağlı olup, aynı zamanda sıvının sıkıştırılabilirlik katsayısıyla ilişkilendirilebilir.

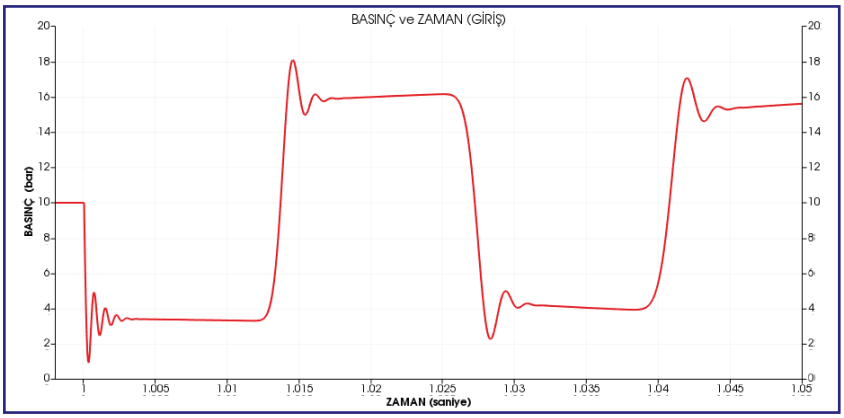
$$K = \rho / \Psi \quad (11)$$



Şekil 4. 5x5x36 ağ sıklığı durumu için borudaki basıç eğrileri, (a) Giriş, (b) Orta, (c) Tahliye

2.4. Ağ Yapısı ve Sayısal Modelleme

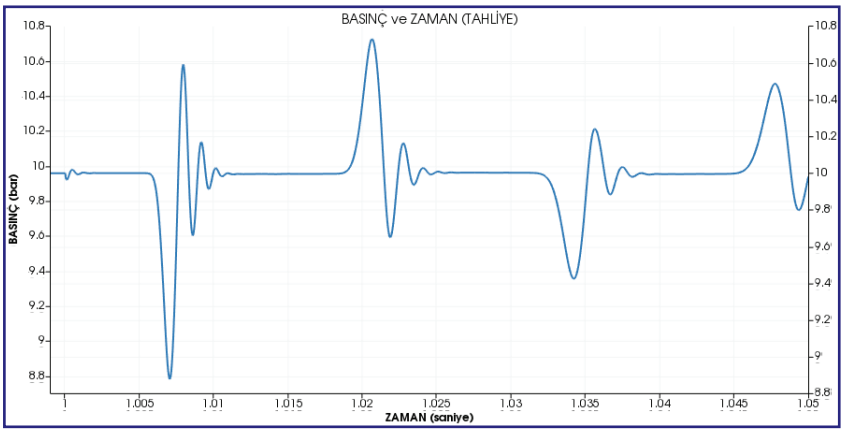
Ağ yapısı adı verilen işlem, akışın gerçekleşeceği hacmin, akışı canlandıracak sonlu elemanlara bölünmesi olarak tanımlanır. Eleman adedi ve elemanın bulunduğu konuma göre elaman yoğunluğunun, akışı en uygun seviyede gerçekleştirecek şekilde seçilmesi ağ yapısı için önem arz etmektedir. İlgili eleman sayısının az seçilmesiyle çözümlemelerin yeterli/istenilen hassasiyetle gerçekleştirilememesi gibi durumlara yol açarken, eleman sayısının çok seçilmesi durumunda ise zaman ve kaynak kullanım miktarı artacaktır. Elemanlara ayırma işlemleri bu hususlara göre gerçekleştirilmiştir.



(a) Boru giriş kısmındaki zamana bağlı basınç eğrisi



(a) Boru orta kısmındaki zamana bağlı basınç eğrisi

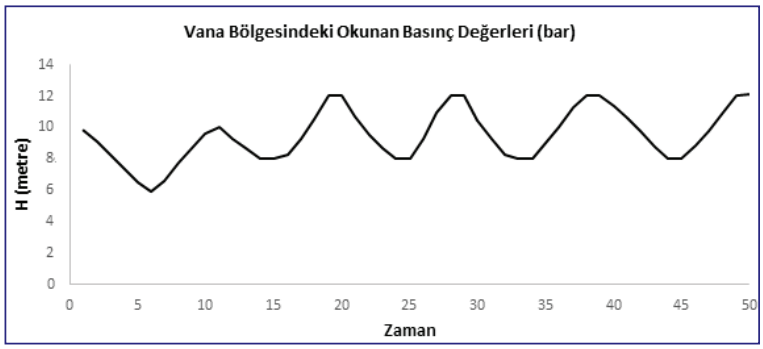


(a) Boru tahliye kısmındaki zamana bağlı basınç eğrisi

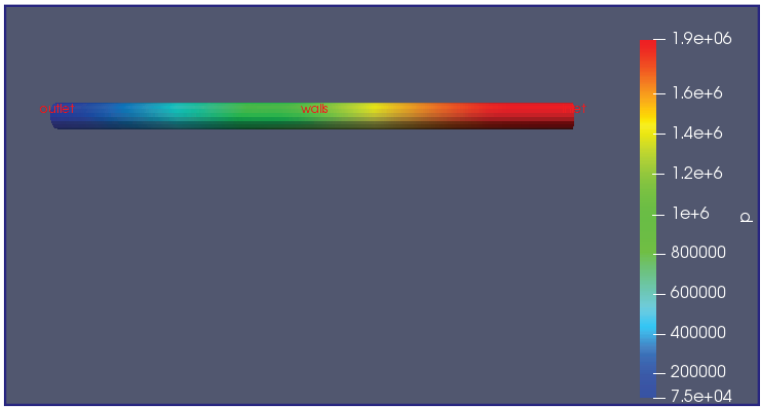
Şekil 5. 5x5x54 ağ sıklığı durumu için borudaki basıç eğrileri, (a) Giriş, (b) Orta, (c) Tahliye

Ayrıca ağ yapısından bağımsız çözüm elde etmek için 5x5x18, 5x5x36 ve 5x5x54 şeklinde olan farklı ağ sıklıklarındaki borular için çözümler yapılmış ve incelenmiştir. Sonuç olarak, her bir ağ yapısına göre olan bulgular için okunan minimum ve maksimum değerlerin yaklaşık olarak eşit olduğu gözlemlenmiştir. Daha yoğun ağ yapısına sahip durumlar için de analiz etmeye çalıştığımız çalışmanın ağ yapısından bağımsız olduğu sağlanmıştır.

Akışın gerçekleşeceği kontrol hacmi için, ilgili yapının aslında bir boru hattı olduğu düşünülerek 1 metre uzunluğunda ve 5 milimetre çapında olan bir boru incelemeye alınmıştır. Boru geometrisinin ve ağ yapısının oluşturulması için OpenFOAM içerisinde yer alan blockMesh sayesinde zamanlama açısından en uygun ağ yapısının bulunması gerçekleştirilmiştir. Bu sayede, istenilen ağ sayısı ve sıklığı ayarlanabilmekte olup, ele alınan su darbesi hesaplamalarında kullanılan bu ağların genel görünümleri Şekil 2'deki gibi gösterilmiştir.



Şekil 6. Tahliye(vana) bölgesinde okunan deneysel veriler [20] (Plot digitizer ile grafik oluşturulmuştur)



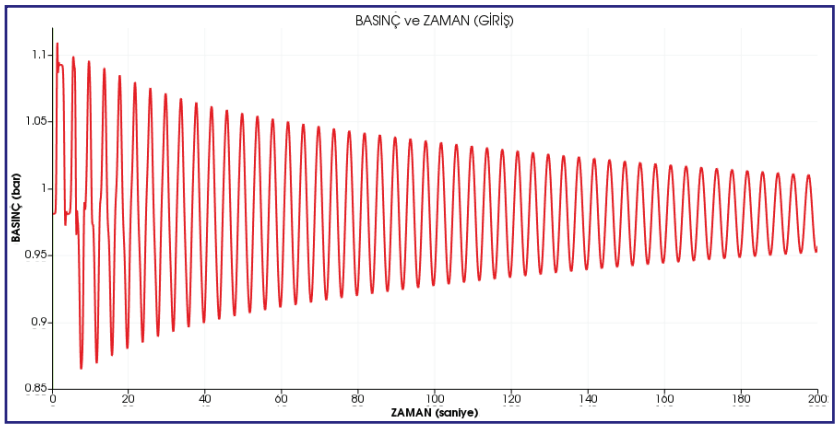
Şekil 7. BlockMesh ile oluşturulan konsept boru görüntüsü

Tablo 2. Analize Dair Sınır Koşulları

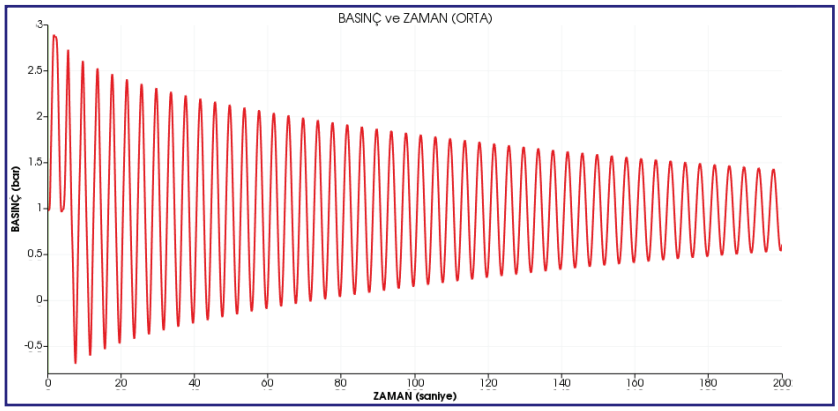
Model unsuru	Sınır koşulları ve işlemler	Sınır koşullarına ait sayısal değerler
Boru giriş	İç basıncın sabit bir şekilde kalmasını sağlayacak sürekli basınç tanımlaması – statik basınç	98100 Pascal (0,98 Bar(g))
Boru çıkış	Tahliye (vana) özelliğine sahip çıkış yapısı – değişken hızlar	Değişken hız profilleri: 0. saniye için hız 0 m/s 5. saniye için hız 1 m/s 10. saniye için hız 1 m/s 14. saniye için hız 1 m/s
Boru dış yüzey	Hız sınır tabakası	-

Sayısal modelleme için transonik/süpersonik sıkıştırılabilir bir sıvının laminer akışı için geçerli olan ve yukarıda anlatılan sonicLiquidFoam adlı çözücüden faydalanılmıştır.

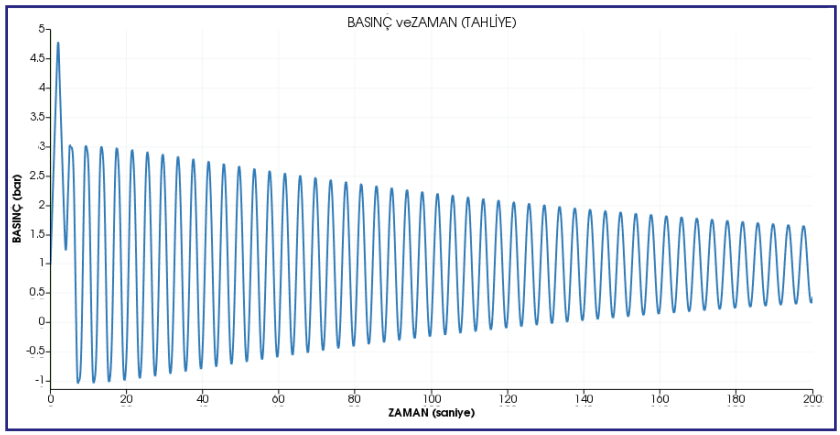
Modelin çözümünde dikkate alınacak sınır koşulu atamaları Tablo 1'de gösterilmiştir. Bu sınır koşulları, ilgili modelin yüzeylerine tanımlanan / uygulanan değerlerdir. OpenFOAM ile yapılan çalışmalarda, ilgili analizin sınır koşullarıyla birlikte, fiziksel özelliklerinin de uygulanabilir şekilde tanımlanması gerekmektedir. Aksi takdirde, gerçek anlamda fiziksel karşılığı olmayan sonuçlar ile karşılaşılabilir.



a. Boru giriş kısmındaki zamana bağlı basınç eğrisi



b. Borunun orta kısmındaki zamana bağlı basınç eğrisi



c. Boru tahliye kısmındaki zamana bağlı basınç eğrisi

Şekil 8. Karşılaştırma analizi sonuçları için elde edilen basınç eğrileri, (a) Giriş, (b) Orta, (c) Tahliye

Şekil 3, 4 ve 5'te 0-1 saniye arasında tanımlanan laminer su akışına sahip olan boru hattının akış yönünde bulunan tahliye vanasını anlık açılıp kapanmasıyla elde edilen basınç yükselmeleri analiz edilmektedir. Ele alınan su darbesi analizleri için farklı ağ yapılarında olan boruların giriş, orta ve çıkış kısımlarındaki su darbesi etkileri gösterilmiştir.

Şekil 3, Şekil 4 ve Şekil 5'de verilen analiz sonuçlarını gösteren grafiklerde genel olarak uyumluluk söz konusu olup, bahsedildiği gibi sonicLiquidFoam adlı çözücünün laminer akışlardaki su darbesi hesaplamasını başarılı bir şekilde yapmaktadır. Analizler için 0 ve 1 s arasındaki süre zarfında sıkıştırılabilir akışkanlar için geçici ya da sürekli olmayan bir çözücü olarak tanımlanan rhoPimpleFoam kullanılmıştır. Bu çözücü ile elde edilen çözümlerde herhangi bir su darbesi olayı görülmezken, 1'nci saniyeden itibaren olan kısımlar yani sonicLiquidFoam çözücüsünün devreye girdiği kısımdan itibaren oluşan basınç dalgalanmaları gözlemlenmiştir.

Boru hatlarının ani boşalması ve/veya doldurulması üzerine birçok deneysel çalışmalar yürütüldüğü bilinmektedir [18] [19]. Bu çalışmada kullandığımız sonicLiquidFoam ile daha önceden yapılmış bir su darbesi deneyine ait sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bunun için, kesit alanı 1 m^2 olan ve uzunluğu 1000 metre olan bir boru hattının, bir ucunda bulunan vananın anlık olarak açılıp kapanmasıyla elde edilecek geçici ve süreksiz bir durum elde edilmeye çalışılmıştır. Şekil 6'da yer alan deneysel veriler, modelleyeceğimiz su darbesi çalışması için karşılaştırma amaçlı kullanılmıştır [20].

Karşılaştırma çalışması için blockMesh aracılığıyla 5x5x18 ağ yoğunluğuna sahip olarak şekilde, 1,1 metre çapında ve 1000 metre uzunluğundaki geometri oluşturulmuştur. Şekil 7'de konsept resim olarak gösterilen boru elde edilmiştir. Boru hattının 1000 metre gibi bir uzunlukta olmasından dolayı boru geometrisine dair görseli buraya eklediğimizde, geometrinin görünürlüğü ve anlaşılırlığı bakımından sorun olabilir düşüncesiyle aşağıdaki konsept resim kullanılmıştır. Bu geometri için yapılan çözümlerde kullanılan sınır koşulları Tablo 2'de verilmiştir.

Analizler sonucu elde edilen bulgular, deneysel verilerdeki maksimum ve minimum basınç değerleri ile kısmen uyum sağlamış olsa da birebir örtüşmediği ortaya çıkmıştır. Bunun ana sebebinin sonicLiquidFoam çözücüsünün yalnız laminer akışları çözebilmesi ve içerisinde bir türbülans modeli barındırmaması olduğu düşünülmektedir.

SONUÇ

Açık kaynak kodlu bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği olan OpenFOAM programı ile akım hızındaki ani değişimler ve yüksek basınç yükü değişimleriyle birlikte meydana gelen aşırı basıncın bir başka deyişle su darbesinin hesaplanabilirliği incelenmiş olup, elde edilen sonuçların su darbesi esnasındaki oluşan basınç dalgalanmalarını gösterir yönde olduğu gözlemlenmiştir.

Ayrıca, boru hattı ağ yapısının OpenFOAM içerisinde bulunan blockMesh aracılığıyla zamandan tasarruf yaparak iyileştirilmesi, su darbesi analizi için farklı ağ yapılarındaki boru durumlarına dair analizlerin hızlı bir şekilde yapılması sağlanmıştır. Oysaki ticari yazılımlar ile yapılan ağ yapısı iyileştirmeleri geometriye de bağlı olarak uzun süreler alabilir ve program kullanıcıları için öngörülemeyen zaman kayıplarına sebep olabilirler.

Sonuç olarak, bu çalışma içerisinde açık kaynak kodlu bir program olan OpenFOAM ve içerisinde yer alan laminer akışlar için geçerli olan ve zamana bağlı akış çözümleyicisi olan sonicLiquidFoam sayesinde boru hatlarında meydana gelebilen su darbesi analizi gerçekleştirilebilmiştir. Gelecek çalışma olarak, bu çözücünün yalnızca laminer akışlar için değil, aynı zamanda türbülanslı akışlar için de geçerli olacağı bir hale getirilmesi amacıyla türbülans modeli ilave edilecektir.

KAYNAKLAR

[1] Ghidaoui, M. S., Zhao, M., Mcinnis, D. A. and Axworthy, D. H., A Review of Water Hammer Theory and Practice, Applied Mechanics Review, 58(1), 49-76, 2005.

[2] Qiaolin Z., Suizheng Q., Wei L., Wenxi T., Guanghui S., Zejun X., Water Hammer Characteristics of Integral Pressurized Water Reactor Primary Loop, 2013.

[3] Kavurmacioğlu, L., Boru Hatlarında Su Darbesi Olayı ve Önleme Çareleri, IX. Tesisat Mühendisliği Kongresi, 2009.

[4] Holmboe, E. L., Rouleau, W. T., The Effect of Viscous Shear on Transients in Liquid Lines, Journal of Basic Engineering, Transactions of the ASME, Vol. 89, No. 1, pp. 174–180, 1967.

[5] Joukowski, N., Water Hammer, Translated by Miss O. Simin, Proceedings of American TFnier TForA's Assoc., Vol. 24, pp. 365 -368, 1904.

[6] Bergant, A., Simpson, A. R., and Vitkovsky, J., Developments in Unsteady Pipe Flow Friction Modelling, J. Hydraul. Res. Vol. 39, No. 3, pp. 249–257, 2001.

[7] Safwat, H., On the Elastic Behavior of the Pipe Wall for Water Hammer Applications, Nuclear Engineering and Design, pp. 85-94, 1972.

[8] Brunone, B., Karney, B. W., Mecarelli, M., Ferrante, M., Velocity Profiles and Unsteady Pipe Friction in Transient Flow, J. of Water Resources Planning and Management, pp. 236-244, 2000.

[9] Ghidaoui, M. S., and Kolyshkin, A. A., Stability Analysis of Velocity Profiles in Water-Hammer Flows, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 127, No. 6, pp. 499–512, 2001.

[10] Streeter, V. L. and Wylie, E. B., Fluid Mechanics, 8th Edition, McGraw Hill NewYork, 1985.

[11] Chaudhry, M. H., Applied Hydraulic Transients, Van Nostrand Reinhold, N Y, 1987.

[12] Wylie, E. B., Streeter, V. L., and Lisheng, S., Fluid Transient in Systems, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1993.

[13] Tijsseling, A. S, Lambert, M. F., Simpson, A. R., Stephens M. L., Vítkovský, J. P., Bergant, A., Skalak's Extended Theory of Water Hammer, Journal of Sound and Vibration, Vol. 310, No. 3, pp. 718-728, 2008.

[14] Chaudhry, M. H., and Hussaini, M. Y., Second-Order Accurate Explicit Finite Difference Schemes for Water Hammer Analysis, J. Fluids Eng., Vol. 107, pp. 523–529, 1985.

[15] Vasudevan, S., Coupling 3D Simulations with 1D Simulations (The Water Hammer Effect), 2017.

[16] Bentley resmi internet sayfası (https://www.bentley.com/en/products/product-line/hydraulics-and-hydrology-software/hammer) ve Pipenet resmi internet sayfası (https://www.sunrise-sys.com/pipenet/transient-module/)

[17] Chrisopher, J., OpenFOAM User Guide Copyright °C 2011-2018 OpenFOAM Foundation Ltd.

[18] Zhou, F.; Hicks, F.; Steffler, P., Transient Flow in a Rapidly Filling Horizontal Pipe Containing Trapped Air, J. Hydraul. Eng., 128, 625–634, 2002.

[19] Zhou, F.; Hicks, F.; Steffler, P., Analysis of Effects of Air Pocket on Hydraulic Failure of Urban Drainage Infrastructure, Can. J. Civ. Eng., 31, 86–94, 2004.

[20] Wang, C., Nilsson, H., Yang, J., and Petit, O., 1D-3D Coupling for Hydraulic System Transient Simulations, Computer Physics Communications, 2016.