



Denizli Buldan Barajı Sarıgöl Sulaması İsale Hattı Su Darbesi Analizleri

Water Hammer Analyses of the Denizli Buldan Dam - Sarıgöl Irrigation Pipeline

Ashlı Bor ^{1*} 

¹ İzmir Ekonomi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, TÜRKİYE
Sorumlu Yazar / Corresponding Author *: asli.turkben@ieu.edu.tr

Geliş Tarihi / Received: 15.06.2020

Kabul Tarihi / Accepted: 27.11.2020

Atıf şekli/ How to cite: BOR A.(2021). Denizli Buldan Barajı Sarıgöl Sulaması İsale Hattı Su Darbesi Analizleri. DEÜ.FMD 23(68), 509-519.

Araştırma Makalesi/Research Article

DOI:10.21205/deufmd.2021236814

Öz

Sulama iletim hatlarında, suyun aniden açılması veya aniden kesilmesi durumları hat içerisinde ani basınç değişimlerine neden olabilir. Su darbesi denilen bu olay, akışkan koşullarının momentumundaki ani değişiklikler veya değişikliklerle ilişkili olarak iletim hattındaki basınç dalgalarının üretilmesini, yayılmasını ve yansımalarını tanımlar. İletim hattındaki kontrolsüz bir su darbesi hattın hasar görmesine neden olabilir, ekipmanlara zarar verebilir ve hatta can kaybına neden olabilir. Hatların proje aşamasında su darbesinin modellenmesi ve gerekli önlemlerin alınması önemlidir. Bu çalışma kapsamında, Denizli Buldan Barajı Sarıgöl Sulaması İsale hattının su darbesi analizleri yapılmıştır. Buldan barajı ile regülatör arasındaki yaklaşık 3400 m'lik iletim kısmı, 2740 ha (brüt), 1870 ha (net) saha alanına sulama hizmeti verecek olan Sarıgöl isale hattı, yoğun olarak mansap deresine karışan sediment ve bunun sonucunda sulamayı olumsuz olarak etkilemesi nedeniyle kapalı borulu olarak yapılması tasarlanmıştır. Bu amaçla, basınçlı sistemlerde yaygın olarak kullanılan karakteristikler metodu adı verilen matematiksel yöntem kullanılarak, zamanla değişen akım şartları altında analizler yapılmıştır. Su darbesini kütle korunum diferansiyel denklemlerinin karakteristik metodu için oluşturulan algoritmayı içeren bilgisayar kodu yazılmıştır. Bu program kullanılarak, bir rezervuar boru vana için su darbesi analizi yapılmıştır ve iletim hattının, su darbeleri nedeniyle meydana gelen basınç değişimleri hesaplanmıştır. Bu analizler sonucunda hatta yerleştirilmesi gereken enerji kırıcı vanaların yerleri ve vana kapanma süreleri önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Denizli Buldan Barajı, Sarıgöl Sulaması, İsale Hattı, Su Darbesi, Vana Kapanma Süreleri, Kararsız Akımlar.

Abstract

In the irrigation transmission lines, sudden opening or sudden cut of water may cause sudden pressure changes in the line. This event, which called as water hammer, describes the generation, propagation and reflection of pressure waves in the transmission line in relation to sudden changes or changes in the momentum of fluid conditions. An uncontrolled water hammer on the transmission line can cause line damage, damage equipment, and even loss of life. It is important to model the water hammer and take the necessary measures during the project phase of the lines. Within the scope of this study, water hammer analyses of Denizli Buldan Dam Sarıgöl Irrigation Transmission Line were conducted. The 3400 m transmission section between Buldan Dam and regulator, the Sarıgöl

transmission line, which will provide irrigation services to 2740 ha (total), 1870 ha (net) field area, is a pressurized pipe due to the downstream sediment and consequently negatively affects irrigation. For this purpose, analyzes were carried out under time-dependent flow conditions using the mathematical method called characteristics methods commonly used in pressurized systems. An implementation of the algorithm created for the characteristic method of water hammer mass conservation differential equations is written. Using this program, water hammer analysis for a reservoir pipe valve was made and elastic deformations and pressure changes of the transmission line due to water hammer were calculated. As a result of these analyzes, the locations of the valves that need to be placed on the line and valve closing times are proposed.

Keywords: Denizli Buldan Dam, Sarıgöl Irrigation, Water Transmission Line, Water Hammer, Valve Closure Durations, Unsteady Flows.

1. Giriş

Bilindiği gibi iletim hatlarında, suyun aniden açılması veya aniden kesilmesi durumlarında, hat içerisinde sıvı hızındaki ani değişimin bir sonucu olarak kararsız akım yani bilinen adı ile "su darbesi" oluşmaktadır. Literatürde, su darbesi denilen fiziksel olay V_0 hızı ile sabit akışın anlık bir vana kapatması ile durdurulduğu ideal rezervuar boru-vana sistemi dikkate alınarak açıklanabilmektedir. Diğer bir deyişle, sıvı akışı ani bir şekilde başladığında veya durduğunda veya akış yönünde ani bir değişiklik yapmak zorunda kaldığında meydana gelir, örneğin, vananın hızlı bir şekilde kapatılması ve bir pompanın aniden durması ile su darbesi oluşabilir [1, 2].

Su darbesi olayı, yüzyıllardır hem teorik hem de deneysel araştırmaların ilgi odağı olmuştur. Tarih öncesi devirlerden beri insanlar suyu ilk yönetmek istemeye başladıklarından beri kararsız akımlar ile ilgilenmişler ve hem sulama amacıyla hem de içme suyu taşımak için kapsamlı basınçlı sistemler geliştirmiştir. Tarihteki ilk bilimsel su darbesi çalışmaları ise ses dalgalarının incelenmesi ile başlanmıştır. Newton, havadaki ses dalgalarını ve kanallardaki su dalgalarının yayılmasını incelemiş ve buna dayanarak "Lagrange hız potansiyeli" kavramını geliştirmiştir. Newton ile teorik olarak suyun hareketinin incelenmesinde ilerideki yıllara ışık tutacak büyük ilerleme kaydedilmiştir. Monge 1789 yılında hız potansiyeli çalışmalarına devam etmiş ve kısmi diferansiyel denklemlerin integrasyonu için grafiksel metot geliştirip karakteristikler metodunu tanımlamıştır [3]. 1800 lü yıllara gelindiğinde Weber boru cidarı elastisitesinin dalga yayılma hızı üzerine etkilerini ölçmüş ve kararsız akım altındaki dinamik ve süreklilik denklemlerini

geliştirmiştir [4]. Kortewag 1878 yılında dalga yayılma hızı denklemini hem borunun hem de akışkanın elastisitesini dikkate alarak geliştirmiştir. Gromeka 1883'de su darbesi analizlerine sürtünme kayıplarını dahil etmiş ve sürtünme kayıplarının doğrudan akım hızı ile orantılı olduğu ve sıvıların sıkışamaz olduğunu kabul etmiştir. 1897'de Joukowski'nin borular üzerine kapsamlı deneyler ile boru cidarının ve suyun elastisitesini hesaba katarak dalga yayılma hızını hesaplayan formül geliştirmiştir [3].

Su darbesi analizlerinin asıl kurucusu İtalyan mühendis Lorenzo Allievi olarak kabul edilmektedir. Allievi 1902 yılında su darbesi analizini sıvıların sıkışamaz ve boru yüzeyinin elastikliği kabulleri ile rijit kolon teorisini ortaya atmıştır. Yakın geçmişte, teknolojinin ilerlemesi ve bilgisayar sistemlerinin hayata girmesi ile de hesaplamalı akışkanlar mekaniği uygulamalarında artış yaşanmıştır [1]. Su darbesi problemini çözmek için günümüze kadar çeşitli yaklaşımlar denenmiştir. Bu yaklaşımlardan karakteristikler metodu, hiperbolik kısmi diferansiyel denklemlerin çözümü için özellikle uygun bir tekniktir ve gelişen bilgisayar teknolojisi ile birlikte, bu metodun bilgisayar uygulamaları birçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır. Son 50 yılda karakteristikler metodu, sonlu farklar ile yazılan bilgisayar kodları ile tesislerdeki istenilen noktalarda ve istenilen zamanlardaki, basıncın hesaplanmasını mümkün kılmıştır [3-18].

Günümüzde basit boru hattı sistemlerinde su darbesinin analizi, basınçlı sistemlerde yaygın olarak kullanılan karakteristikler metodu adı verilen matematiksel yöntem kullanılarak bilgisayarlı kararsız akış modelleri büyük bir başarıyla kullanılmaktadır [19-21].

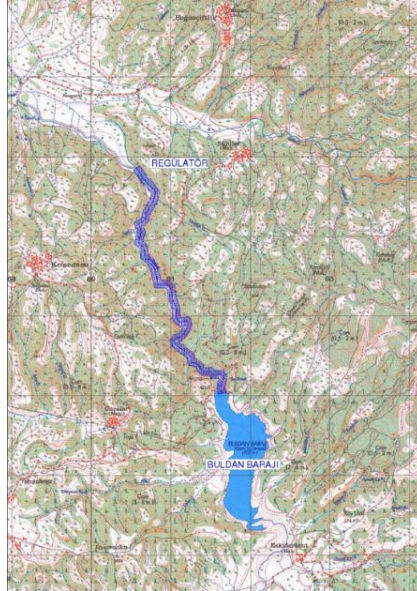
İletim hattındaki kontrolsüz bir su darbesi hattın hasar görmesine neden olabilir, ekipmanlara zarar verebilir ve hatta can kaybına neden olabilir. Bu sebeple, basınçlı sistem boru hatlarında su darbesi tahkiki su darbesinin önlenmesi bakımından büyük önem taşır. Bu çalışma kapsamında, ekonomik değeri yüksek Denizli Buldan Barajı Sarıgöl Sulaması İsale hattının su darbesi analizleri üç farklı yaklaşımla yapılmıştır. İlk yaklaşım için dalga yayılma hızını kullanarak basit basınç artışı hesabı yapılmıştır. Borunun elastik deformasyona uğrayacağı kabulü ile ikinci bir analiz yapılmış olup, üçüncü yaklaşım olarak, basınçlı sistemlerde yaygın olarak kullanılan karakteristikler metodu adı verilen matematiksel yöntem kullanılarak, kararsız akım şartları altında su darbesi analizleri yapılmıştır. Vananın ne kadar sürede kapatılırsa darbeden etkilenmeyeceğini hesaplamak için Allievi abağı kullanılmıştır. Bu analizler sonucunda hatta yerleştirilmesi gereken enerji kırıcı vanaların yerleri ve vana kapanma süreleri önerilmiştir.

2. Çalışma Alanı

Buldan Barajı, Denizli'de Kadıköy ve Azmak derelerinin beslediği sulama ve taşkın amaçlı 1964 ile 1967 yılları arasında inşa edilmiş kil çekirdekli kaya dolgu barajdır. Gövde hacmi 0.7

hm³, talvegden yüksekliği 59.00 m, maksimum kotunda göl hacmi 44.8 hm³ ve maksimum kotunda göl alanı 2.9 km² dir. 2740 ha (brüt), 1870 ha (net) saha alanına sulama hizmeti vermektedir.

Buldan Barajı cebri boru sonu ile sulama alanı başlangıcındaki regülatör yapısı arası yaklaşık olarak 3400 m dir. Bu hat üzerinde dere yatağında yüzey akışın toprağı aşındırma etkisi ve buna bağlı olarak toprak erozyonu oldukça fazladır. Toprak erozyonu sonucu yataкта özellikle yoğunluklu olarak ince malzemenin olması, suyun askıda madde sediment konsantrasyonunu arttırdığı görülmüştür. Hattın sonunda yer alan regülatöre kadar taşınan malzeme burada çökelmeye uğramıştır. Konsantrasyonun maksimuma ulaştığı sulama bölgesinde suyun kalitesi düşmüş ve sulama olumsuz etkilenmiştir. Sulama suyunun dere yatağındaki toprak erozyonundan etkilenmesini önlemek amacı ile Buldan Barajının kuyruk suyunun boru içerisine alınmasına karar verilmiştir. Böylece yataktan sediment taşınmamış olacak ve suyun kalitesi bozulmayacaktır. Boru hattı dere yatağını takip edecek ve regülatöre bir adet enerji kırıcı yapı ile bağlanacaktır. Şekil 1, Denizli Buldan Barajı'nın ve Sarıgöl Sulaması isale hattının yerini göstermektedir.



Şekil 1. Bölgenin kuşbakışı görünümü

Proje kapsamında 2 adet ön çalışma yapılmıştır. Yapılan ilk ön çalışmaya göre, kuyruk suyunun hemen girişte bir depo ile biriktirilmesi, depodan sonra yaklaşık 250 m lik hattın zemin şartlarının kötü olduğu bölgeden beton gömleklilik çelik boru ile geçirilmesi, geri kalan yaklaşık 3000 m lik hattın ise HDPE boru tamamlanması kararı alınmış ve bu karar ile ilgili maliyet analizi yapılmıştır. Dere hattının yer yer kayalık olması, depodaki birikmenin istenilen basınç yüksekliğini sağlayamaması gibi sebepler ile ikinci bir ön çalışma yapılmıştır. Bu kapsamda biriktirme deposu olmadan, sulama suyu barajın dip savağından alınıp, tamamı çelik boru basınçlı sistemle regülatöre iletilmesi düşünülmüştür. Böylece basınç yüksekliğinin baraj su kotunu kullanarak artırılması hedeflenmiştir. Ön çalışma sonucuna göre, sağladığı avantajlar ve maliyet analizleri sonucunda, yapılan 2. ön çalışmanın uygulanmasına karar verilmiş ve proje bu doğrultuda devam etmiştir. Buna göre; baraj dip savağı çıkışında su iletim, çelik boru hattına alınmış ve ana kanala kadar borulu olarak devam ettikten sonra basıncı kırılarak ana kanala bağlanmıştır.

3. SARIGÖL SULAMASI İSALE HATTI HİDROLİK HESAPLARI

3.1. Buldan Barajı Su Alma Yapısı ile Tünel Çıkışı (Proje Başı) Arası Enerji Hesapları

Hidrolik hesaplar açısından kritik kotlar barajın maksimum su alma kotu 502.60 m ile minimum su alma kotu 471.00 m'dir. Maksimum su alma kotuna göre iletim hattı oluşturulup, maksimum basınçlar hesaplanmış, minimum su alma kotuna göre suyun iletimi tahkik edilmiştir. Baraj kapsamında bulunan, baraj su alma yapısından, tünel çıkışına kadar olan tesisteki yersel yük kayıpları Tablo 1'de verilmiştir.

Su alma yapısı ile tünel çıkışına kadar olan toplam yersel yük kayıpları $\sum h_k = 18.54 m$ olarak hesaplanmıştır. Yersel kayıplara göre, proje başı maksimum piyezometre kotu: 484.06 m, proje başı minimum piyezometre kotu: 452.46 m, proje başı boru eksen kotu: 447.61 m, proje başı maksimum işletme basıncı: 36.45 m, proje başı minimum işletme basıncı: 4.85 m ve proje başı maksimum statik basınç: 55 m'dir.

Boru hattı için St37 çeliği $\phi 1000$ çapı seçilmiştir ($\sigma=1200 \text{ kg/cm}^2$ ve $\beta=0.85$). Maksimum su kotu: 502.60 m, boru çıkış eksen kotu: 333.00 m ve maksimum su yükü: 170 m olmak üzere; seçilen

$S_{pas}= 2.5 \text{ mm}$ pas payına sahip $\phi 1000$ 'lik çelik boru için iç basınca göre et kalınlığı hesabı aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır.

$$S = \frac{0.05HD}{\sigma\beta} + S_{pas} = \frac{0.05*170}{1200*0.85} D + S_{pas} = 10.8 \text{ mm} \quad (1)$$

$S=10.8\text{mm}$ hesaplanmıştır. Dış basınca göre hesap yapılırsa gömülü borular için;

$$S = 1000 \left[\frac{2 * 1}{2 * 2.1 * 10^6} \right] = 7.81 \text{ mm} \quad (2)$$

Olarak hesaplanır. Güvenli tarafta kalmak için et kalınlığı $t=12 \text{ mm}$ olarak seçilmiştir.

Tablo 1. Tesisteki yersel ve sürekli yük kayıpları.

Bölge	h_k (m)
Beton kaplamalı Tünel (L=295.00m)	0.0024
Sulama Borusu (Çapı $\phi 600$, L=198.00m)	11
Yuvarlatılmış giriş ağzı	0.0001
Tedrici Daralma	1.17
Dirsek Kayıpları (8 adet)	4.4
Ayar Vanası	0.33
Kelebek Vana (2 adet)	1.64

3.2. Tünel Çıkışı (Proje Başı) ile Enerji Kırıcı (Proje Sonu) Arası Enerji Kayıpları

Basınçlı hat $t=12 \text{ mm}$ et kalınlığında, $\phi 1000$ 'lik ($D_{dış}=1016 \text{ mm}$, $D_{iç}=992 \text{ mm}$) çelik boru olarak boyutlandırılmıştır. Toplam çekilen debi $Q=2 \text{ m}^3/\text{s}$ olup, boru alanı $A=0.77 \text{ m}^2$ ve boru içindeki hız $V=2,59 \text{ m/s}$ 'dir. Reynolds sayısı $R_e = 2.57 * 10^6$ olup akım Türbülanslıdır. Rölatif pürüzlülük; $\frac{k_s}{D} = 0.000046$ ve Moody diyagramından; sürtünme katsayısı $f=0.012$ olmak üzere sürekli kayıp Darcy - Weisbach formülüne göre hesaplanırsa;

$$h_k = \frac{0.012 * 2.57^2 * 3483}{1 * 19.62} = 14.07 \text{ m} \quad (3)$$

bulunmaktadır. Aynı hesap Williams Hazen formülü ile yapılırsa; (çelik boru için $C=130$);

$$J = \frac{10.67 * Q^{1.852}}{D^{4.87} C^{1.852}} \quad (4)$$

$$= \frac{10.67 * 2^{1.852}}{0.992^{4.87} * 130^{1.852}}$$

$$= 0.0049 \text{ m/m}$$

olarak hesaplanır. Bu değer, Darcy - Weisbach formülü ile hesaplanan değerden daha yüksek olduğu için bu proje için esas olarak alınmıştır.

Tünel Çıkışı (Proje Başı) ile Enerji Kırıcı (Proje Sonu) Arası yersel yük kayıpları Tablo 2'de verilmiştir.

$$JL = 0.0049 * 3483 = 16.97 \text{ m} \quad (5)$$

Denizli Buldan barajı Sarıgöl sulaması isale hattı'na ait hesaplanan tüm hidrolik değerler Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 2. İsale hattındaki yersel yük kayıpları.

Bölge	Yersel Enerji Kaybı	h _k (m)
0+000.00 km - 0+500.00 km	1 Hat açma kapama vanası, 1 tahliye vanası, 1 hava vanası	0.31
	30°, 23°, 27°, 13°, 5°, 18°, 10°, 16°, 23°, 16°, 7°, 12° yatay dirsek	0.56
	20°, 40°, 30°, 50°, 30°, 30°, 30°, 20° düşey dirsek	
0+500.00 km - 1+000.00 km	32°, 39°, 17°, 20°, 23°, 36°, 25°, 16°, 30° yatay dirsek	0.47
	1°, 4°, 4°, 2° düşey dirsek	
1+000.00 km - 1+500.00 km	1 hava vanası	0.1
	18°, 32°, 53°, 19°, 51°, 20°, 12°, 2° yatay dirsek	0.41
	1°, 1°, 1°, 4°, 4° düşey dirsek	
1+500.00 km - 2+000.00 km	15°, 13°, 35°, 33°, 6°, 5°, 11°, 9°, 32°, 11°, 25°, 14°, 13°, 2°, 43° yatay dirsek	0.57
	2°, 3°, 1° düşey dirsek	
2+000.00 km - 2+500.00 km	28°, 18°, 18°, 18°, 15° yatay dirsek	0.25
	1°, 1°, 2°, 2°, 2° düşey dirsek	
2+500.00 km - 3+000.00 km	1 hava vanası, 1 tahliye vanası	0.2
	41°, 24°, 7°, 15°, 21°, 12°, 30°, 2°, 34°, 41°, 20°, 9°, 19°, 1°, 57°, 38°, 11° yatay dirsek	0.73
	2°, 1°, 1°, 1°, 4° düşey dirsek	
3+000.00 km - 3+500.00 km	3°, 16°, 8°, 5°, 2°, 9°, 11°, 36°, 8° yatay dirsek	0.27
	3°, 2° düşey dirsek	

Tablo 3. Denizli Buldan barajı Sarıgöl sulaması isale hattı hidrolik değerler tablosu.

HİDROLİK DEĞERLER TABLOSU																		
BORU ADI	KESİT NO	KM BAŞLANGIÇ	KM BİTİŞ	L (m)	Kot (m)	Q (lt/s)	V (m/s)	J (m/m)	BORU TİPİ	BORU ÇAPI Ø (mm)	BORU İÇ ÇAPI D (mm)	SÜREKLİ KAYIPLAR (m)	MAX. PİYEZOMETRE KOTU (m)	MIN. PİYEZOMETRE KOTU (m)	MAX. İŞLETME BASINCI (m)	MIN. İŞLETME BASINCI (m)	STATİK BASINÇ (m)	DAYANMA BASINCI (ATÜ)
A1	1	0	105.00	105	447.61	2000	2.59	0.004871	ÇELİK	1016	992	0.51	484.06	452.46	36.45	4.85	55	16
A2	2	105.00	210.00	105	449.00	2000	2.59	0.004871	ÇELİK	1016	992	0.51	483.55	451.95	33.55	1.95	53	16
A3	3	210.00	250.00	40	446.00	2000	2.59	0.004871	ÇELİK	1016	992	0.19	482.94	451.24	36.84	5.24	57	16
A4	4	250.00	290.00	40	445.00	2000	2.59	0.004871	ÇELİK	1016	992	0.19	482.65	451.05	37.65	6.05	58	16
A5	5	290.00	400.00	110	432.00	2000	2.59	0.004871	ÇELİK	1016	992	0.54	482.11	450.51	50.11	18.51	71	16
A6	6	400.00	435.00	35	430.00	2000	2.59	0.004871	ÇELİK	1016	992	0.17	481.94	450.34	51.94	20.34	73	16
A7	7	435.00	480.00	45	429.81	2000	2.59	0.004871	ÇELİK	1016	992	0.22	481.72	450.12	51.91	20.31	73	16
A8	8	480.00	525.96	46	427.00	2000	2.59	0.004871	ÇELİK	1016	992	0.22	480.63	449.03	53.63	22.03	76	16
A9	9	525.96	580.00	54	425.99	2000	2.59	0.004871	ÇELİK	1016	992	0.26	480.36	448.76	54.37	22.77	77	16
A10	10	580.00	740.00	160	422.00	2000	2.59	0.004871	ÇELİK	1016	992	0.78	479.59	447.99	57.99	25.99	81	16
A11	11	740.00	880.00	140	418.00	2000	2.59	0.004871	ÇELİK	1016	992	0.68	478.90	447.30	60.90	29.30	85	16
A12	12	880.00	930.00	50	413.00	2000	2.59	0.004871	ÇELİK	1016	992	0.24	478.66	447.06	65.66	34.06	90	16
A13	13	930.00	1040.00	110	410.00	2000	2.59	0.004871	ÇELİK	1016	992	0.54	477.65	446.05	67.65	36.05	93	16
A14	14	1040.00	1125.00	85	408.00	2000	2.59	0.004871	ÇELİK	1016	992	0.41	477.24	445.64	69.24	37.64	95	16
A15	15	1125.00	1225.00	100	403.00	2000	2.59	0.004871	ÇELİK	1016	992	0.49	476.75	445.15	73.75	42.15	100	16
A16	16	1225.00	1313.56	89	400.00	2000	2.59	0.004871	ÇELİK	1016	992	0.43	476.32	444.72	76.32	44.72	103	16
A17	17	1313.56	1405.00	91	396.00	2000	2.59	0.004871	ÇELİK	1016	992	0.45	475.88	444.28	79.88	48.28	107	16
A18	18	1405.00	1465.00	60	394.00	2000	2.59	0.004871	ÇELİK	1016	992	0.29	475.58	443.98	81.58	49.98	109	16
A19	19	1465.00	1495.00	30	391.00	2000	2.59	0.004871	ÇELİK	1016	992	0.15	474.93	443.33	83.93	52.33	112	16
A20	20	1495.00	1715.00	220	385.14	2000	2.59	0.004871	ÇELİK	1016	992	1.07	473.86	442.26	88.72	57.12	117	16
A21	21	1715.00	1877.34	162	379.94	2000	2.59	0.004871	ÇELİK	1016	992	0.79	473.07	441.47	93.13	61.53	123	16
A22	22	1877.34	1950.00	73	378.00	2000	2.59	0.004871	ÇELİK	1016	992	0.35	472.71	441.11	94.71	63.11	125	16
A23	23	1950.00	1995.00	45	375.00	2000	2.59	0.004871	ÇELİK	1016	992	0.22	472.49	440.89	97.49	65.89	128	16
A24	24	1995.00	2070.00	75	374.00	2000	2.59	0.004871	ÇELİK	1016	992	0.37	471.56	439.96	97.56	65.96	129	16
A25	25	2070.00	2196.16	126	370.97	2000	2.59	0.004871	ÇELİK	1016	992	0.61	470.94	439.34	99.96	68.36	132	16
A26	26	2196.16	2265.00	69	369.00	2000	2.59	0.004871	ÇELİK	1016	992	0.34	470.61	439.01	101.61	70.01	134	16
A27	27	2265.00	2335.00	70	366.00	2000	2.59	0.004871	ÇELİK	1016	992	0.34	470.27	438.67	104.27	72.67	137	16
A28	28	2335.00	2380.00	45	365.00	2000	2.59	0.004871	ÇELİK	1016	992	0.22	470.05	438.45	105.05	73.45	138	16
A29	29	2380.00	2435.00	55	362.00	2000	2.59	0.004871	ÇELİK	1016	992	0.27	469.78	438.18	107.78	76.18	141	16
A30	30	2435.00	2515.00	80	360.00	2000	2.59	0.004871	ÇELİK	1016	992	0.39	469.14	437.54	109.14	77.54	143	16
A31	31	2515.00	2595.00	80	355.00	2000	2.59	0.004871	ÇELİK	1016	992	0.39	468.75	437.15	113.75	82.15	148	16
A32	32	2595.00	2685.00	90	353.00	2000	2.59	0.004871	ÇELİK	1016	992	0.44	468.31	436.71	115.31	83.71	150	16
A33	33	2685.00	2735.00	50	351.00	2000	2.59	0.004871	ÇELİK	1016	992	0.24	468.07	436.47	117.07	85.47	152	16
A34	34	2735.00	2815.00	80	349.00	2000	2.59	0.004871	ÇELİK	1016	992	0.39	467.68	436.08	118.68	87.08	154	16
A35	35	2815.00	2925.00	110	344.00	2000	2.59	0.004871	ÇELİK	1016	992	0.54	467.14	435.54	123.14	91.54	159	16
A36	36	2925.00	2965.00	40	345.00	2000	2.59	0.004871	ÇELİK	1016	992	0.19	466.95	435.35	121.95	90.35	158	16
A37	37	2965.00	2995.00	30	350.00	2000	2.59	0.004871	ÇELİK	1016	992	0.15	465.97	433.37	115.97	84.37	159	16
A38	38	2995.00	3147.00	152	344.00	2000	2.59	0.004871	ÇELİK	1016	992	0.74	465.23	433.63	121.23	89.63	163	16
A39	39	3147.00	3274.12	127	339.00	2001	2.59	0.004852	ÇELİK	1017	993	0.62	464.61	433.01	125.61	94.01	164	25
A40	40	3274.12	3385.00	111	338.00	2002	2.58	0.004833	ÇELİK	1018	994	0.54	464.08	432.48	126.08	94.48	165	25
A41	41	3385.00	3430.00	45	335.00	2003	2.58	0.004813	ÇELİK	1019	995	0.22	463.86	432.26	128.86	97.26	168	25
A42	42	3430.00	3482.58	53	333.00	2004	2.57	0.004794	ÇELİK	1020	996	0.25	463.34	431.74	130.34	98.74	170	25

4. SU DARBESİ ANALİZLERİ

4.1. Temel Matematiksel Denklemler

Bu çalışma kapsamında, su darbesi analizlerinde yaygın olarak kullanılan karakteristikler metodu adı verilen matematiksel yöntem kullanılarak, zamanla değişen akım şartları altında, Denizli Buldan Barajı Sarıgöl Sulaması İsale hattının su darbesi analizleri yapılmıştır. Karakteristikler metodu tesislerdeki istenilen noktalarda ve istenilen zamanlardaki, basıncın hesaplanmasını mümkün kılması nedeniyle literatürde kullanılan en güvenilir metotlardan biridir. Basıncı boru sistemlerinde, kararsız akım şartları altında, akışkanın sıkışabilir ve boruda elastik deformasyonların olduğu kabul edilmektedir. Newton'un II. Hareket kanunu ve süreklilik denklemini kullanarak aşağıdaki matematiksel ifadeleri elde edebiliriz.

$$g \frac{\partial H}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad (6)$$

$$V \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} - V \sin \alpha + \frac{a^2 \partial V}{g \partial x} = 0 \quad (7)$$

Bu denklemlerde g =yer çekimi ivmesi, α =borunun yatayla yaptığı açı, V =hız, H =piyezometre kotu, a =boru içerisindeki basınç dalgasının hızı, D =boru çapı, f =Darcy-Weisbach sürtünme katsayısı, t =zaman ve x =mesafedir. Basınç dalgasının yayılma hızı, gömülü borular için;

$$a^2 = \frac{\frac{K}{\rho}}{1 + \left(C_1 \frac{D K}{e E} \right)} \quad (8)$$

Şeklinde yazılabilir. Burada K = suyun hacimsel elastisite modülü, ρ = suyun yoğunluğu, μ = Poisson oranı, E =çelik borunun Young elastisite modülü, e =borunun et kalınlığıdır. C_1 katsayısı aşağıdaki formül ile hesaplanabilir.

$$C_1 = \frac{2e}{D} (1 + \mu) + \frac{D(1 - \mu^2)}{e + D} \quad (9)$$

Metotun amacı, borunun her noktasında tüm zaman değerleri için akım ortalama hızı $V(x,t)$ ve

piezometre kotunu $H(x,t)$ hesaplamaktır. Boru eğimi etkisi çok küçük kaldığı için ihmal edilebilir.

4.2. Sayısal Çözüm

Karakteristikler metodu ile yarı doğrusal hiperbolik (6) ve (7) kısmi diferansiyel denklemleri, adi diferansiyel denklemlere dönüştürülebilmektedir [3]-[18]. Konuma göre türev terimleri, zamana göre türev terimlerinden göreceli olarak çok küçük olduğu için ihmal edilebilir. Bu denklemleri adi iki diferansiyel denklem haline çevirmek için hem pozitif eğimli, hem de negatif eğimli karakteristik boyunca geçerli olan, $\frac{dx}{dt} = a$ ve $\frac{dx}{dt} = -a$ ivme bilinmeyenini kullanılır. Böylece denklem (6) ve (7) aşağıdaki adi diferansiyel denklemlere dönüşmüş olur.

$$\frac{g}{a} \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad (10)$$

$$-\frac{g}{a} \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad (11)$$

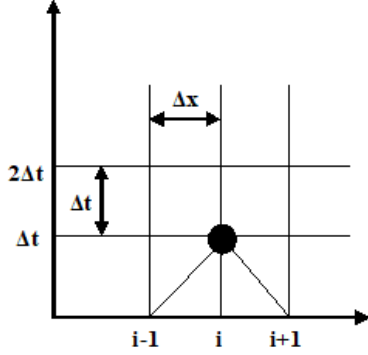
Bu çalışmada, denklemleri çözmek için sonlu elemanlar tekniği kullanılmıştır [22 ve 23]. Sonlu elemanlar tekniği ile bütün denklemler aynı anda çözülmektedir ve büyük matrisler gerektirmez bu yüzden uygulaması kolaydır. Uygulama yapılırken L uzunluğundaki boru n eşit parçaya bölünmüş olup $\Delta x = L/n$ ve $\Delta t = \Delta x/n$ olarak tanımlanmış ve $\Delta t \leq \Delta x/a$ şeklindeki Courant kısıtı sağlanmıştır. Şekil 2'de görüldüğü gibi i ara noktası karakteristiğin kesişim noktasıdır. Q_i ve H_i değerleri aşağıdaki denklemlerin beraber çözümü ile bulunur.

$$H_i - H_{i-1} - \frac{a_{i-1}}{gA} (Q_i - Q_{i-1}) - \frac{a_{i-1}f}{2gDA^2} Q_{i-1} |Q_{i-1}| (t_i - t_{i-1}) = 0 \quad (12)$$

$$H_i - H_{i+1} - \frac{a_{i+1}}{gA} (Q_i - Q_{i+1}) - \frac{a_{i+1}f}{2gDA^2} Q_{i+1} |Q_{i+1}| (t_i - t_{i+1}) = 0 \quad (13)$$

Yukarıdaki denklemlerde i indisi herhangi bir t anında hesaplandığı noktayı göstermekte olup,

Δt zaman adımı öncesi bir sonraki ve bir önceki noktadaki $(i+1)$, $(i-1)$ değerler bilinmektedir. Şekil 2'de bu indislerin x-t hesaplama düzlemindeki yerlerini göstermektedir.



Şekil 2. Sayısal çözüm için kullanılan hesap düzlemi

Su darbesi analizleri, isale hattına ait sınır şartları altında geliştirilen bilgisayar kodu ile yapılmıştır.

4.3. Bulgular

Boru hatlarındaki su darbesi analizlerinde ek basınçları etkileyen en önemli neden hat boyunca veya hat sonundaki vana operasyonlarıdır. Vana ani olarak kapatıldıktan sonra su depoya doğru geri dönecektir. Bu geri dönme hareketinde boru içerisine sıkışacak ve boruyu genişletmeye çalışacaktır. Bu çalışma kapsamında maksimum basınçlar kontrol edilmiş, kapanma süreleri hesaplanmış ve hat boyunca konması gereken vanalar belirlenmiştir. Su darbesi analizleri için öncelikle pratik bir yaklaşım olan, dalga yayılma hızını kullanarak maksimum basınç artışı tahkik edilmiştir. Akışkanın hacimsel elastisite modülü, $K=2.2 \times 10^9$ MPa; çeliğin elastisite modülü, $E=2.07 \times 10^{11}$ MPa; boru iç çapı, $D=0.992$ m; boru et kalınlığı; $t=0.012$ m; akışkanın yoğunluğu, $\rho = 1000$ kg/m³ ve akışkanın hızı, $V=2.59$ m/s olmak üzere, toprağa gömülü çelik boru için dalga yayılma hızı:

$$a = \frac{\sqrt{\frac{2.2 \times 10^9}{1000}}}{\sqrt{1 + \frac{2.2 \times 10^9 \cdot 0.992}{207 \times 10^9 \cdot 0.012} (1 - 0.3^2)}} \quad (14)$$

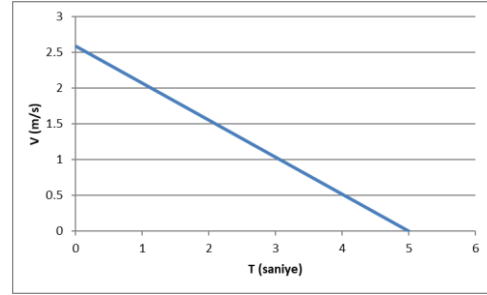
$$= 1106 \text{ m/s}$$

olarak hesaplanmıştır. Su darbesinden kaynaklanan maksimum basınç artışı ilk yaklaşım için;

$$\Delta h = \frac{a}{g} \Delta V = \frac{1106}{9.81} \cdot 2.59 = 292 \text{ m} \quad (15)$$

İlk yaklaşıma göre hat içerisinde toplam basınç hesabı yapılırsa, hat içinde statik basıncın maksimum 170 m olacağı bilindiğinden su darbesi ile birlikte toplam basınç $P=170+292=462$ m olacaktır.

Vanaların ani kapatıldığı zaman borunun elastik deformasyona uğrayacağı düşünülüp ikinci bir hesap yapılmıştır. Tablo 2'den de görüleceği gibi statik basınç $P= 170$ m ve toplam hat uzunluğu güvenli tarafta kalınp $L= 3500$ m alınmış, vananın ise kapanma süresi kısa bir sürede kapatılacağı varsayımı ile $T_{\text{kapanma}}=5$ saniye alınmıştır. Vana kapanma eğrisi aşağıdaki Şekil 3 gibi olduğu kabulü yapıp bu durumda basınç dalgasının regülatöre ulaşma süresi:



Şekil 3. Vana kapanma eğrisi

$$\mu = \frac{2L}{a} = \frac{2 \cdot 3500}{1106} = 6.3 \text{ s} \quad (16)$$

olarak hesaplanmıştır. $T_{\text{kapanma}} < \mu$ olduğu için hızlı kapanma meydana gelecektir, yani basınç dalgası rezervuara kadar gidip genişleyerek tekrar bulunduğu bölgeye erişmeden kapanma işlemi sona ermektedir. μ zaman zarfında hız V_0 ilk hız değerinden sıfıra düşmektedir. Hızlı kapanma süresini Δ kadar küçük parçalar halinde bölüp hesaplırsak ;

$$\Delta h = \frac{a \Delta V}{g} = \frac{1106}{9.81} \Delta V \quad (17)$$

Şiddeti kadar bir su darbesi olacaktır. İlk kapanmada meydana gelen basınç dalgasına, ikinci kısmi kapanma basınç dalgası eklenecektir. Bu şekilde Δ kadar basınç dalgası eklenik olarak artarak kapanmanın sonunda;

$$h = \sum \Delta h \quad (18)$$

Şiddetinde maksimum basınç artması oluşacaktır. T_{kapanma} süresi 5 saniye ve $\Delta t=1$ saniye için vanada oluşacak maksimum basınç değerleri Tablo 3'de sunulmuştur.

Tablo 3. Vanada oluşacak maksimum basınç değerleri.

t(s)	1	2	3	4	5
$\Delta V(\text{m/s})$	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52
$\Delta h(\text{m})$	58.6	58.6	58.6	58.6	58.6
h(m)	58.6	117	176	234	293
H(m)	229	287	346	404	463

Üçüncü yaklaşım olarak, kütle korunum diferansiyel denklemlerinin karakteristik yöntemiyle çözülmesiyle elde edilmesi prensibi ile yazılmış bilgisayar kodu ile bir rezervuar boru vana için su darbesi analizi yapılmıştır.

Yatay eksenindeki dirsekler ihmal edilmiştir. Program girdi değerleri Tablo 4'de sunulmuştur. Boru 10 parçaya ayrılmıştır ($\Delta x=350$ m). En kötü senaryo olarak vananın 1 saniyede kapatılacağı düşünülmüş ve $t_{\text{max}} = 10$ saniye için hesap yapılmıştır. Buna göre boru hattı üzerinde, $x=1050$ m, $x=1750$ m, $x=2800$ m, ve $x=3500$ m konumlarında olacak basınç grafiği Şekil 4'de verilmiştir.

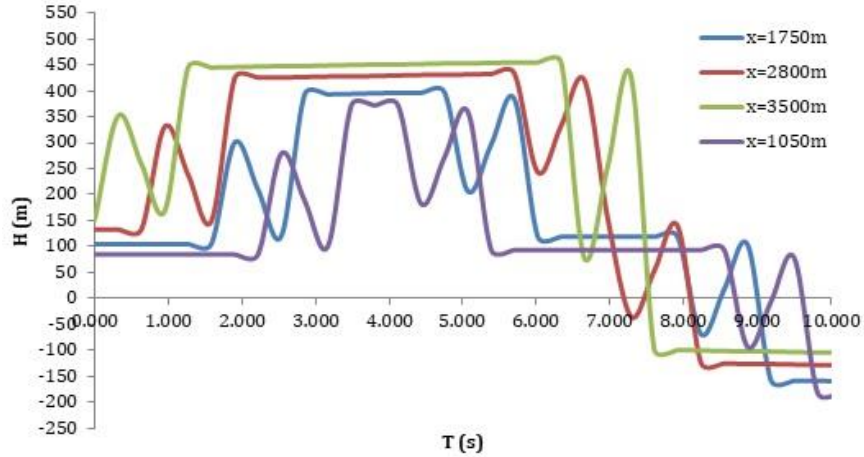
Grafikten de görüldüğü gibi basıncın $H=450$ m mertebelerinde olduğu görülmektedir. Bu yaklaşım en gerçekçi yaklaşımdır.

Vananın ne kadar sürede kapatılırsa darbeden etkilenmeyeceğini hesaplamak için Allievi abağı kullanılmıştır. Basınçlı hat parametresi ρ ve vana işletme parametresi ϕ ;

$$\rho = \frac{aV}{2gH} = \frac{1106 * 2.56}{2 * 9.81 * 170} = 1.38 \quad (19)$$

$$\phi = \frac{aT}{2L} = \frac{1106 * T(\text{saniye})}{2 * 3500} \quad (20)$$

Olmak üzere, her bir saniye için basınç yükselme faktörü Z^2 değerleri hesaplanmış ve Tablo 5'de sunulmuştur.



Şekil 4. Hatun belirli kesitlerindeki zamanla değişen basınç yükseklikleri eğrileri

Tablo 4. Sayısal çözüm sınır şartları.

L (m)	f	VZERO (m/s)	HZERO (m)	ELEVUP (m)	ELEVDN (m)	TCLOSE (s)	TMAX (s)	Δt (s)
	0.01	2.59	502.6	447.6	336.2	1	10	0.316

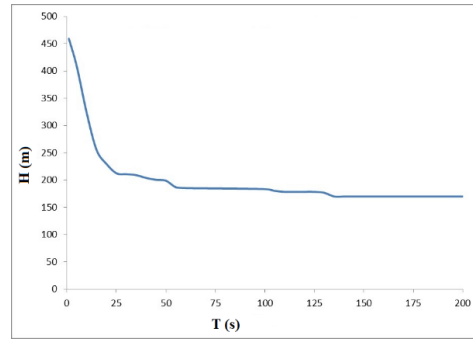
Tablo 5. Allievi abağı kullanılarak hesaplanan basınç yükselme faktörü Z² değerleri.

T(s)	ρ	φ	Z ²	H (m)
1	0.85	0.16	2.7	459
5	0.85	0.79	2.4	408
10	0.85	1.58	1.9	323
15	0.85	2.37	1.5	255
20	0.85	3.16	1.35	229.5
25	0.85	3.95	1.25	212.5
30	0.85	4.74	1.24	210.8
35	0.85	5.53	1.23	209.1
40	0.85	6.32	1.2	204
45	0.85	7.11	1.18	200.6
50	0.85	7.9	1.17	198.9
55	0.85	8.69	1.1	187
60	0.85	9.48	1.09	185.3
100	0.85	15.8	1.08	183.6
105	0.85	16.59	1.06	180.2
110	0.85	17.38	1.05	178.5
115	0.85	18.17	1.05	178.5
120	0.85	18.96	1.05	178.5
125	0.85	19.75	1.05	178.5
130	0.85	20.54	1.04	176.8
135	0.85	21.33	1	170
140	0.85	22.12	1	170
145	0.85	22.91	1	170
150	0.85	23.7	1	170
155	0.85	24.49	1	170
160	0.85	25.28	1	170
165	0.85	26.07	1	170
170	0.85	26.86	1	170
175	0.85	27.65	1	170
180	0.85	28.44	1	170
185	0.85	29.23	1	170
190	0.85	30.02	1	170
195	0.85	30.81	1	170
200	0.85	31.6	1	170

Genel Olarak;

- Mansap vanasının kapanması = (+) Birincil Dalga, (-) ΔV
- Mansap vanasının açılması = (-) Birincil Dalga, (+) ΔV Oluşmasına neden olur. Aşağıda Allievi abağına göre vana kapanma süresine göre oluşacak basınç değerleri grafiği verilmiştir. Şekil 5'den vana kapanma süresine göre vanada oluşacak maksimum basınçlar okunabilir. Bu Şekilden de görüleceği gibi vanaların 2

dakikadan fazla kapatılması hattaki basıncı etkilemeyecektir. Vanaların 2 dakikada kapatılması yaklaşık 170 m basınç yüksekliği meydana getirecektir.

**Şekil 5.** Vana kapanma süresine göre basınç miktarı

5. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, Denizli Buldan Barajı Sarıgöl Sulaması İsale hattının su darbesi analizleri üç farklı yaklaşımla yapılmıştır. Buldan Barajının derivasyon tüneli çıkışındaki ayar vanasından itibaren sulama suyu debi $Q=2 \text{ m}^3/\text{s}$ olmak üzere $\phi 1000$ lik tek çelik boru tahliye yapısına iletilecektir. Hat boyunca su darbesi analizlerinde basınçları tetikleyen unsur hat sonunda bulunan vana operasyonlarıdır. Vana kapanma biçimi ve süreleri, analizleri yapılan hat basınçların şiddetini kontrol etmektedir. İshale hattındaki vanaların ne kadar sürede kapatılırsa darbeden etkilenmeyeceğini hesaplamak için Allievi abağı kullanılmıştır. Bu analizler sonucunda hatta yerleştirilmesi gereken enerji kırıcı vanaların yerleri ve vana kapanma süreleri önerilmiştir. Bu analizlere göre su darbesinden güvenli bir şekilde kaçınmak için ve Sarıgöl İsale hattı işletmesinin daha pratik yapılabilmesi için hatta yerleştirilen vanaların hepsinin aynı sürede ve minimum 3 dakika süresince kapatılması önerilmektedir. Hat kırılma emniyet vanalarının kapanma eğrisi standart olarak aynı olması iletim hattının işletmesi açısından pratik olmaktadır. Tahliye yapısı ile mevcutta var olan ve dolu savaktan sonra yer alan enerji kırıcı yapısına ve

devamında dere yatağına güvenli bir şekilde bırakılacaktır. Tahliye vanası boru hattının başlangıcından itibaren yaklaşık 5 m ileride yer almaktadır. Tahliye yapısından hemen sonra hat açma kapama vanası bulunmaktadır. Ayrıca boru hattının yaklaşık ortasına, 1+495.00 km sinde de hattın güvenliğini sağlamak için bir adet hat açma kapama vanası konması uygun görülmüştür. Boru hattının içinde oluşabilecek hava ve bu havanın su darbesi etkisinin arttırılabileceği düşüncesi ile hattın zorlandığı noktalarda, (hat başlangıcı, hat ortası ve hat sonu) hava girişini ve hattın havanın tahliye edilmesini sağlamak amacıyla Çift Küreli Hava Vanası konmuştur. Hattın tüm koruma yapıları aşağıda listelenmiştir:

- 1) 0+005.00 km Tahliye Vanası ϕ 100 + Hat Açma Kapama Vanası ϕ 1000 Kelebek vana
- 2) 0+105.00 km Çift Küreli Hava Vanası ϕ 200
- 3) 1+495.00 km Çift Küreli Hava Vanası ϕ 200 + Hat Açma Kapama Vanası ϕ 1000 Kelebek vana
- 4) 2+925.00 km Tahliye Vanası ϕ 100
- 5) 2+995.00 km Çift Küreli Hava Vanası ϕ 200

Teşekkür

Yazar, bu çalışmada kullanılan verileri sağlayan DSİ 2. Bölge Proje ve İnşaat Şube Müdürü Sayın Nevzat Tatar'a teşekkür eder.

Kaynakça

- [1] Su, C.-K., Camara, C., Kappus, B., Putterman, S.J. 2003. Cavitation Luminescence in a Water Hammer: Upscaling Sonoluminescence, *Journal of Physics of Fluids*, Vol. 15, No. 6, pp. 1457- 1461. DOI: 10.1063/1.1572493.
- [2] Wood, D. J. 2005. Water Hammer Analysis - Essential and Easy, *Journal of Environment Engineering*, Vol. 131, No:8, pp. 1123-1131. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9372(2005)131:8(1123).
- [3] Chaudhry, M. H. 1987. *Applied Hydraulic Transients*. 2nd ed. Van Nostrand Reinhold Company. New York, USA.
- [4] Watters, G.Z. 1979. *Modern Analysis and Control Of Unsteady Flow in Pipelines*. Ann Arbor Science Publishers. Michigan, USA, 251 pages.
- [5] Abbott, M. 1966. *An Introduction to the Method of Characteristics*. Elsevier. New York, USA, 243 pages.
- [6] Gray, C.A.M. 1953. Analysis of the Dissipation of Energy in Water Hammer. *Proceedings of ASCE*, Vol. 119, Paper:274, 1176-1194.
- [7] Gray, C.A.M. 1954. Analysis of Water Hammer by Characteristics. *Proceedings of ASCE*, Vol. 119, 1176-1189.
- [8] Ezekial, F.D., Paynter, H.M. 1957. Computer Representation of Engineering Systems Involving Fluid Transients, *Transactions of ASME*, Vol. 79, 1840-1850.
- [9] Streeter, V.L., Lai, C. 1962. Water Hammer Analysis Including Friction, *Journal of Hydraulics Division*, Vol. 88, 79-112.
- [10] Streeter, V.L., Wylie, E.B. 1967. *Hydraulic Transients*. McGraw-Hill, 329 pages.
- [11] Streeter, V.L., Wylie, E.B. 1972. Unsteady Flow Calculation by Numerical Methods, *Journal of Basic Engineering*, ASME, Vol. 94, 457-466.
- [12] Streeter, V.L., Wylie, E.B. 1983. *Mecánica de Fluidos*. McGraw-Hill.
- [13] Wylie, E.B., Streeter, V.L. 1993. *Fluid Transients in Systems*. Prentice Hall, USA.
- [14] Tullis, J.P. 1989. *Hydraulics of Pipelines*. J. Wiley & Sons Inc., USA.
- [15] Thorley, A.R.D. 1989. Check Valve Behaviour Under Transient Flow Conditions: A State-of-the Art Review, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 111, 178-183.
- [16] Larock, B.E., Jeppson, R.W., Watters, G.Z. 2000. *Hydraulics of Pipeline Systems*. CRC Press, USA.
- [17] Gürsel, T.K., Çağlar A. 2014. Küresel Valflerde Su Darbesi Etkisinin İncelenmesi, *SDÜ Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, Cilt. 2, No. 2, 91-101. DOI: 10.21923/mbtd.91149.
- [18] Nerella, R., Rathnam E.V. 2015. Fluid Transients and Wave Propagation in Pressurized Conduits due to Valve Closure. *Procedia Engineering*, Cilt. 127, 1158-1164.
- [19] Larsen, J.K., Lassen, K.L., Jensen, R.K. 2018. Modelling of a Two Phase Water Hammer, Aalborg, Norway.
- [20] Bozkuş, Z. 2008. Çamlıdere-İvedik İsale Hattında Su Darbesi Analizleri. *Teknik Dergi, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Cilt. 19, No. 2, s. 4409- 4422*.
- [21] Kaşıkçı, N. S., Güney, M. Ş. 2009. Pompa Durmasıyla Oluşan Kararsız Akımların Deneysel ve Teorik Olarak Araştırılması, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt. 24, No. 2, s. 359-368.
- [22] İstanbullu, A. 2019. Analysis of Water Hammer Effects Inside Pipelines Using Advanced CFD Techniques. *Marmara Üniversitesi. Doktora Tezi*.
- [23] Lax, P.D. 1954. *Weak Solutions of Nonlinear Hyperbolic Equations and Their Numerical Computation*, *Communications on Pure and Applied Mathematics*, Vol. 7, 159-193.