

Nehir Tipi Hidroelektrik Santrallerde Su Darbesine Karşı Alınabilecek Önlemler

Melih ÇALAMAK*
Zafer BOZKUŞ**

ÖZ

Su darbesi yaygın olarak hidroelektrik santrallerin (HES) cebri borularında, su dağıtım şebekelerinde ve boru hatlarında oluşan, zamana bağlı olarak değişen bir hidrolik problemdir. Yetersiz işletme koşullarından ya da sistemdeki bir arızadan dolayı boru hattı çökebilir ya da patlayabilir. Bu makalede küçük hidroelektrik santrallerin cebri borularındaki su darbesi problemlerine karşı alınabilecek önlemler araştırılmıştır. Çalışmada zamana bağlı değişen akışın doğrusal olmayan kısmi diferansiyel denklemlerini çözmek için karakteristikler metodunu kullanan bir bilgisayar programı kullanılmıştır. Bir örnek üzerinde, nehir tipi bir HES'in ani yük atma durumu altındaki su darbesi davranışı herhangi bir koruyucu önlem olmaksızın ve üç farklı koruyucu önlemlerle ayrı ayrı analiz edilmiştir. Alınan önlemler sayesinde cebri boruda oluşan su darbesi basınçlarında büyük ölçüde düşüş gözlenmiş ve bu önlemlerin etkili ve kullanılabilir oldukları gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Su darbesi, zamana bağlı akış, nehir santralleri, cebri borular, koruyucu önlemler

ABSTRACT

Protective Measures against Waterhammer in Run of River Hydropower Plants

Waterhammer is an unsteady hydraulic problem which is commonly found in the penstocks of hydropower plants, water distribution networks and pipeline systems. Due to either a malfunction of the system or inadequate operation conditions, pipeline may collapse or burst. In this paper protective measures against waterhammer problems in the penstocks of small hydropower plants are investigated. In the study, a computer program employing method of characteristics is used to solve nonlinear partial differential equations of transient flow. In a case study, waterhammer responses of a river hydropower plant under instant load rejection without a protective measure and with three different protective measures are analyzed. It is observed that, by means of protective measures waterhammer pressures in the penstock are substantially diminished, and it is shown that these measures are effective and practical.

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 19.08.2011 günü ulaşmıştır.
- 31 Aralık 2012 gününe kadar tartışmaya açıktır.

* Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara - calamak@metu.edu.tr

** Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara - bozkus@metu.edu.tr

Keywords: Waterhammer, transient flow, run of river plants, penstocks, protective measures

1. GİRİŞ

İşletmedeki küçük bir HES'in kesintisiz ve sorunsuz enerji üretimi son derece önemlidir. Bir HES'in tasarım aşamasında yapılan tüm çalışmalar onun emniyetli ve güvenilir işletilmesi amacıyla odaklanmıştır. Sistemdeki zamana bağlı olmayan akış koşulları, cebri borudaki basınç ve hız gibi parametrelerde bir değişiklik yaratmadığı için işletmenin en güvenli durumlarıdır. Fakat enerji üretimi durumunda türbinlenen suyun akış koşullarının değişmesi, cebri borudaki akış koşullarında da değişikliklere neden olur ve kapalı iletim hattı boyunca akış parametreleri zamana bağlı olarak değişmeye başlar. Bu durum cebri boruda aşırı boyutlarda yüksek ve/veya düşük basınçların oluşmasına neden olabilir. Bu basınçlar da sistemde çok büyük zararlara yol açabilirler. Türbinler, vanalar ve cebri boru üzerindeki çeşitli donanımlar zarar görebilir, hatta cebri boru patlayabilir veya içe çökebilir. Tarihte su darbesinin neden olduğu, önemli ölçüde zararlara yol açmış ve can kayıplarına neden olmuş çok büyük kazalar vardır. Amerika Birleşik Devletleri'ndeki Bartlett Barajı ve Oneida Hidroelektrik Santrali'ndeki türbin vanalarının yanlış işletilmesinden dolayı büyük bir kaza meydana gelmiş ve beş kişi yaşamını yitirmiştir [1]. 1997'de Polonya'da küçük bir HES'in cebri borusu santralin kabul testlerinde su darbesi sebebiyle yırtılmıştır [1]. Son olarak, Japonya'daki Oigawa Hidroelektrik Santrali'ndeki vanaların ani kapanması sonucu oluşan kazada ise cebri boru patlamış ve üç işçi yaşamını yitirmiştir [2].

Bir hidroelektrik santralde su darbesine yük atma, ani yük atma, yük alma, türbin akım ayar ekipmanlarındaki ya da vanalardaki bir arıza veya yükleme havuzundaki su kotunda olan ani değişiklikler neden olabilir. Normal işletme koşullarında, bir elektrik ağını besleyen jeneratöre bağlı olarak çalışan hidrolik türbin sabit bir dönme hızında ve frekansta çalışmak zorundadır. Frekansta olacak herhangi bir değişiklik türbinin ve jeneratörün dönme hızında dolaylı olarak değişikliğe neden olur. Türbin hızındaki değişikliğin hemen ardından türbin tipi Francis ise türbin ayar kanatlarında, Pelton ise su jetlerindeki iğne vananın açıklığında ve/veya yönünde değişiklik yapılarak türbin senkronize hızında tutulmaya çalışılır ya da tamamen durdurularak olası zararlardan korunur. Bütün bu değişiklikler türbinlenen suyun miktarında ve diğer akış parametrelerinde değişikliğe neden olur ve cebri boruda su darbesi basınçlarının oluşmasıyla sonuçlanır.

Nehir tipi hidroelektrik santraller genellikle küçük polar atalet momentine sahip türbinlerle ve oldukça uzun cebri borularla donatıldıkları için su darbesi etkilerine oldukça açıktırlar. Bunlara özgü koruyucu önlemler genel olarak mekanik ekipmanları ve cebri boruyu su darbesinin zararlı etkilerinden korumak için kullanılır. Bu önlemler büyük boru hatlarında ya da büyük hidroelektrik santrallerde kullanılanların aksine küçük ve ucuz ekipmanlardır. Küçük hidroelektrik santrallerde kullanılabilen basınç düşürücü vana veya güvenlik membranı hem güvenli hem de ekonomiktir. Mekanik aksamın güvenliği için ise volan çarkının kullanılması uygundur [3].

1.1. Önceki Çalışmalar

Kapalı iletim hatlarındaki zamana bağlı değişen akış konusu karmaşıklığı ve uygulamadaki önemi sebebiyle birçok araştırmacının ilgisini çekmektedir. Bu yüzden su darbesi konusundaki çalışmaların oluşturduğu literatürün boyutları etkileyici derecede büyüktür. Su darbesi kavramındaki temel ve teorik gelişmeler araştırmacıları bu konunun hidroelektrik santrallere özgü oluşumu yönünde çalışmaya itmiştir. Hovey hidroelektrik santrallerin hidrolik stabilitesini çalışan araştırmacılardan biridir. HES'lerdeki su darbesi etkilerini guvernörlerin amortisör zamanlarını ayarlayarak kontrol edebilmeyi araştırmıştır ve bu çalışmasındaki metodunu Manitoba HES'te uygulamıştır. Hovey'in ana kriteri kritik yük değişimi durumlarında türbin hız artışının kabul edilebilir zamanlarda sönümlenmesiydi [4]. Hagihara ve diğerleri yine guvernör parametreleri üzerindeki çalışmalarıyla santrallerin hidrolik stabilitelemlerini araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmalarda zamana bağlı akışın hesaplarında rijit su sütunu yaklaşımını kullanmışlardır [5].

Jimenez ve Chaudhry yaptıkları çalışmada cebri borunun elastisitesini ve su sütununun sıkışabilirliği etkilerini de hesaba katarak bir santraldeki su darbesi etkilerini araştırmış ve bir analitik stabilize kıstası belirlemişlerdir [6]. Peicheng ve diğerleri ise Linzhengqu Hidroelektrik Santrali üzerinde yaptıkları deneyler sonucunda küçük hidroelektrik santrallerde basınç düşürücü vanalar ve güvenlik membranlarının denge bacası yerine kullanılabileceğini göstermişlerdir [7]. Ni ve diğerleri ise güvenlik membranlarının analizlerinde kullanılacak matematiksel modelleri geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri model ile seçtikleri bir HES için yaptıkları analiz sonucunda karşılaştırmalarda bulunmuşlar ve saha ölçümlerinin model ölçümleriyle oldukça yakın sonuç verdiğini göstermişlerdir [8].

Ramos ve Almeida küçük HES'lerdeki türbin davranışını daha iyi karakterize eden ve su darbesi etkilerini parametrelerle açıklayan yeni bir teknik geliştirmiştir. Çalışmadaki yaklaşım hidrolik türbini dinamik bir orifise benzetmiştir. Yaptıkları modelleme ve sahadaki ölçüm sonuçlarını karşılaştırmışlar ve buldukları metodun santrallerin tasarım aşamasında kullanılabilecek güçlü bir araç olduğunu göstermişlerdir [9]. Selek ve diğerleri ise Türkiye'deki Çatalan Hidroelektrik Santrali'nin kabul testi sırasında yapılan türbin kapanma çalışmalarını modellemiştir. Çalışmada zamana bağlı akış koşullarının denklemleri karakteristikler metodunun farklı hesaplama düzenleriyle ayrı ayrı hesaplanmış ve yerinde ölçülen gerçek verilerle hesaplanan veriler karşılaştırılmıştır. Bu hesaplama düzenlerinden değişken-grid yönteminin en gerçekçi sonucu verdiğini belirtilmiştir [10].

Karadzic ve diğerleri Pelton türbinlerin su darbesi modellemelerinde kullanılabilecek yeni yaklaşım geliştirmiştir. Karakteristikler metodunda kullanılmak üzere Pelton türbin için ayrı bir sınır koşulu tanımlanmıştır. Geliştirdikleri çözüm metodu Pelton tipi türbinlerin dönen parçalarının dinamik davranışını tanımlamaktadır. Metodlarının geçerliğini Perucia HES'te yaptıkları deneylerle ispatlamışlardır. Santraldeki hesaplanan ve ölçülen su darbesi basıncı ve türbin hızı değerlerinin birbirlerine çok yakın olduğunu göstermişlerdir [11]. Vakil ve Firoozabadi ise farklı türbin kapanma eğrilerinin su darbesi basınçları ve türbin hızı üzerine olan etkilerini araştırmıştır. Kendi geliştirdikleri, karakteristikler metodunu kullanan sayısal model ile işletme halindeki bir Francis türbinin çeşitli kapanma eğrileri altındaki hız ve basınç artışlarını tayin etmişler ve sonuçlarını müşavir firmanınkiyle karşılaştırıp modellerini geçerli kılmışlardır [12].

2. KARAKTERİSTİKLER METODU VE MATEMATİKSEL MODEL

Kapalı bir iletim hattı için yapılan su darbesi analizlerinin amacı hattın herhangi bir noktasındaki hız (V) veya debisi (Q) ve basınç (P) veya piyezometrik yüksekliğin (H) herhangi bir anda belirlenebilmesidir. Bunun için de zamana bağlı akımı tanımlayan iki adet denklem kullanılır. Momentum ve süreklilik denklemleri adı verilen bu eşitlikler genelde basınç (P) ve hız (V) değişkenleri ile ifade edilirler. Denklem 1 ve 2'de sırasıyla momentum ve süreklilik denklemleri verilmiştir.

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + g \sin \theta + \frac{4\tau_w}{\rho D} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + V \frac{\partial P}{\partial x} + \rho a^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

Yukarıda θ boru ekseninin yatayla yaptığı açığı, τ_w boru cidarındaki kayma gerilmesini, D boru iç çapını, a basınç dalgası hızını, ρ akışkanın yoğunluğunu ve g ise yer çekimi ivmesini göstermektedir. Bu denklemler doğrusal olmayan kısmi diferansiyel denklemlerdir. Karakteristikler metodu bu denklemlerin numerik olarak çözülebilmesi için kullanılan, dünyaca kabul görmüş bir yöntemdir. Bu metotla yukarıdaki denklemler dört adi diferansiyel denkleme dönüştürülür. Daha sonra dönüştürülen bu denklemler de integre edilerek kolayca çözülebilen sonlu farklar denklemleri elde edilir. C^+ ve C^- karakteristik denklemleri olarak adlandırılan bu denklemler aşağıda verilmiştir.

$$\text{Eđer } \frac{dx}{dt} = +a \quad \text{ise} \quad \frac{1}{\rho} \frac{dP}{dt} + a \frac{dV}{dt} + aF = 0 \quad (3)$$

$$\text{Eđer } \frac{dx}{dt} = -a \quad \text{ise} \quad \frac{1}{\rho} \frac{dP}{dt} - a \frac{dV}{dt} - aF = 0 \quad (4)$$

Denklem 3 ve 4 yalnızca tanımlı oldukları karakteristik lineer eğri üzerinde geçerlidir. Bu denklemlerdeki F terimi Denklem 1'de yer alan yer çekimi ivmesi ve kayma gerilmesini içeren terimlerin yerine kullanılmıştır. Şekil 1'de gösterilen x-t düzleminde $+1/a$ ve $-1/a$ eğime sahip olan iki eğri sırasıyla C^+ ve C^- karakteristik eğrileridir ve Denklem 3 ve 4'ün geçerli olduğu çizgilerdir. Bu çizgiler fiziksel olarak su darbesi düzensizliğinin takip ettiği yolları temsil etmektedir. Denklemlerin C^+ ve C^- karakteristik eğrileri boyunca integrasyonu sonucunda iki adet uygunluk denklemi elde edilir. Denklem 5 ve 6'da bu denklemler verilmiştir.

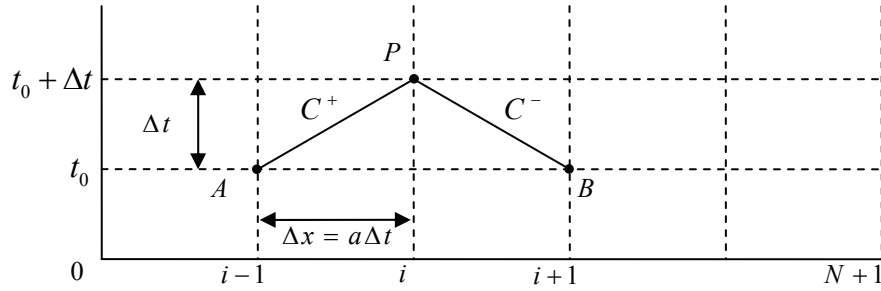
$$C^+ : H_{P_i} = C_P - BQ_{P_i} \quad \text{ve} \quad C_P = H_{i-1} + BQ_{i-1} - RQ_{i-1}|Q_{i-1}| \quad (5)$$

$$C^- : H_{P_i} = C_M + BQ_{P_i} \quad \text{ve} \quad C_M = H_{i+1} - BQ_{i+1} + RQ_{i+1}|Q_{i+1}| \quad (6)$$

burada;

$$B = \frac{a}{gA} \quad \text{ve} \quad R = \frac{f\Delta x}{2gDA^2} \quad (7)$$

Yukarıda f cebri borudaki sürtünme katsayısını, Δx mesafe aralığını, A ise boru enkesit alanını göstermektedir.



Şekil 1. Zaman-mesafe düzlemindeki karakteristik çizgiler

Karakteristikler metodunu kullanarak yapılacak bir su darbesi analizinde kurulan matematiksel model, sistem üzerinde bulunan elemanların belirlediği sınır koşullarının denklemlerini içerir. Nehir tipi bir hidroelektrik santralin su darbesi için kurulan matematiksel modeli oldukça fazla sınır koşulundan ve dolayısıyla da karakteristik denklemlerden oluşabilir. Bu denklemlerin çözümü birbirini tekrarlayan adımlardan oluştuğundan bilgisayar ile programlamaya oldukça uygundur. Bu araştırmada kullanılan örnek çalışmada, seçilen nehir tipi hidroelektrik santralin su darbesi analizlerini yapabilmek için karakteristikler metodunu kullanan Bentley HAMMER adlı bilgisayar programı kullanılmıştır. Programda nehir tipi hidroelektrik santralde bulunan yükleme havuzu, türbin gibi sınır koşullarının yanında denge bacası, hava odacığı, volan çarkı, basınç düşürücü vana ve güvenlik membranı gibi koruyucu önlemlerin de sınır koşulları ve karakteristik denklemleri ön tanımlı olarak bulunmaktadır.

3. ÖRNEK ÇALIŞMA VE ANALİZLER

Örnek çalışmada işletme halinde bulunan Erfelek Hidroelektrik Santrali'nin üç farklı senaryo ile su darbesi analizleri yapılmıştır. Santral Orta Karadeniz Bölümü'nde, Sinop ilindeki Karapınar Çayı üzerinde bulunmaktadır. İki adet özdeş Francis türbin ile 6.45 MW'lık güç üretmekte ve Nisan 2010'dan beri işletilmektedir. Santralin cebri borusunun uzunluğu 1518.7 m olup, 8 mm ve 14 mm arasında değişen et kalınlıklarına sahip 19 adet farklı uzunluklarda boru parçalarından oluşmaktadır. Ana borunun çapı 1300 mm'dir. İki türbini beslemek için ana boru santral binası önünde branşman ile ayrılmakta ve branşmandan sonraki çap 900 mm olmaktadır. Santralin cebri borusunun özellikleri Çizelge 1.'de verilmiştir. Santralin Francis türbin ünitelerinin hidrolik ve mekanik özellikleri ise Çizelge 2.'de verilmiştir. Santralde su darbesine karşı kurulu bir koruyucu ekipman bulunmamaktadır.

Çizelge 1. Erfelek HES cebri borusunun özellikleri

Segment No.	Uzunluk (m)	Et kalınlığı (mm)	Basınç dalgası hızı (m/s)	Çap (mm)
1	34.51			
2	15.15			
3	152.99			
4	224.19			
5	136.81	8	920.36	
6	79.02			
7	30.13			
8	121.14			
9	57.38			1300
10	36.28	10	982.63	
11	31.53			
12	30.61			
13	61.36			
14	74.05			
15	69.42	12	1031.93	
16	120.10			
17	6.83			
18	172.39	14	1072.07	
19	64.80			
Branşman x 2	19.78	14	1160.40	900

Çizelge 2. Francis türbinlerin temel özellikleri

Tip	Yatay eksenli Francis
Özdeş türbin sayısı	2
Türbin gücü (kW)	2 x 3225
Türbin hızı (rpm)	1000
Türbin debisi (m ³ /s)	2 x 1.83
Brüt düşü (m)	204.90
Net düşü (m)	197.90
Türbin atalet momenti (kg.m ²)	4800 (türb. + jen.)
Türbin çark çapı (mm)	552

Bu çalışmada üç farklı senaryoda ani yük atma durumu için su darbesi basınçları hesaplanmıştır. Bu senaryoların her biri farklı koruyucu yapılar içermektedir. Bunlarla ilgili açıklayıcı bilgi Çizelge 3.'te gösterilmiştir.

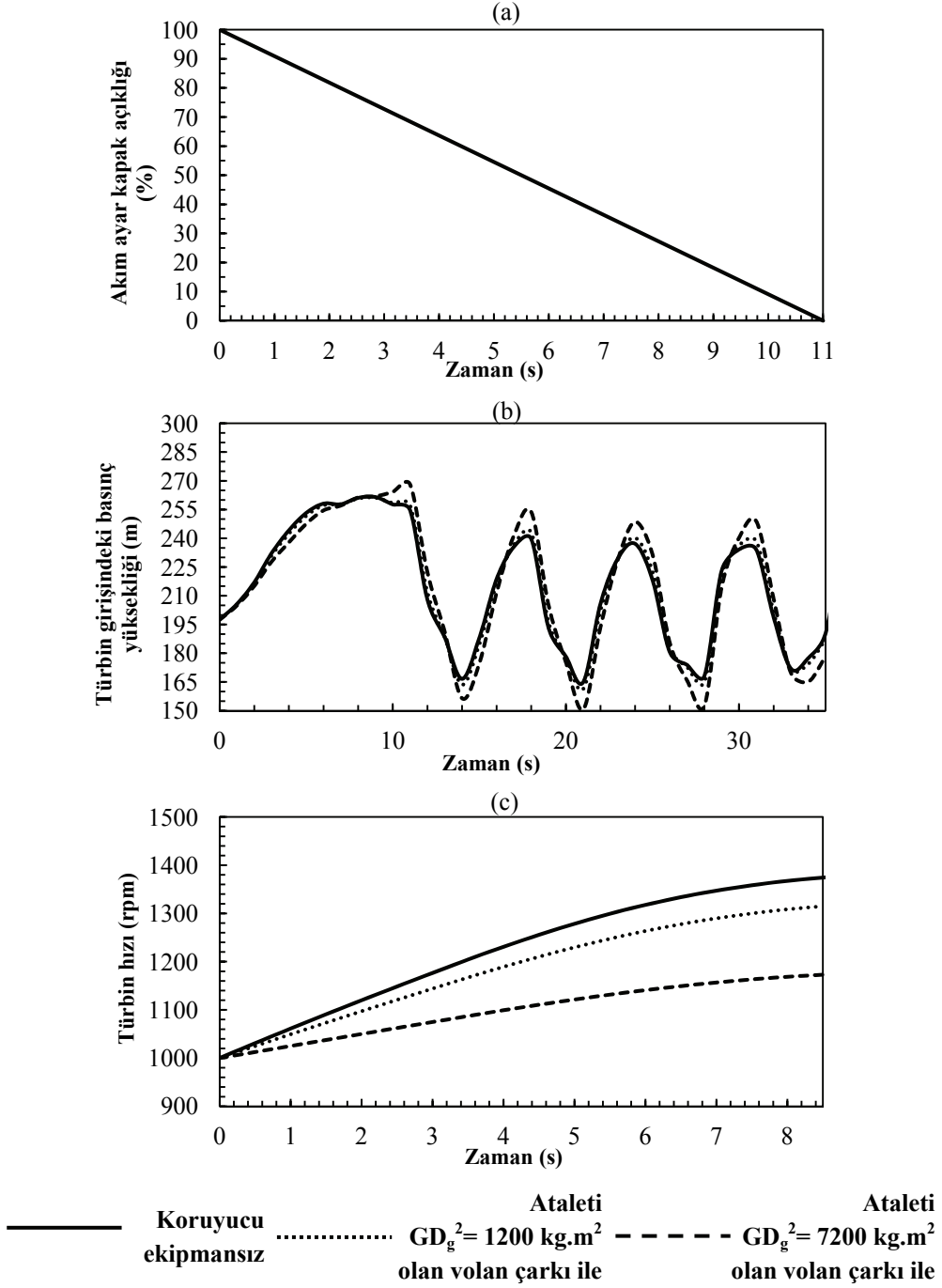
Çizelge 3. Modellenen senaryoların tanımları

	İşletme durumu	Koruyucu ekipman
Senaryo A	Ani yük atma	Volan çarkı
Senaryo B	Ani yük atma	Basınç düşürücü vana
Senaryo C	Ani yük atma	Güvenlik membranı

Santrallerin işletme anında ani yük atma durumuyla karşılaşması, türbinlerin kısa süre içinde durdurulmasını gerektirir. Erfelek HES'te böyle bir durumda türbinlerin akım ayar kanatlarının kapanması lineer bir eğilim ile 11 saniye sürmektedir. Santralde en kritik basınçları oluşturan durum olduğu için analizlerde ani yük atma durumu göz önüne alınmıştır. Analizlerde önce santralin koruyucu bir ekipman olmaksızın (uygulamadaki halinin) modeli kurulmuş ve su darbesi basınçları hesaplanmıştır. Daha sonra üç senaryo ile su darbesine karşı alınabilecek önlemlerin analizi yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Tüm analizlerde her iki türbinin de nominal debi, düşü ve güç koşullarında çalıştığı varsayılmıştır.

3.1. Senaryo A: Volan Çarkı Etkisiyle Ani Yük Atma Durumu

Volan çarkı türbin ve jeneratör ikilisinin polar atalet momentini büyük ölçüde arttıran mekanik aksamı koruyan bir araçtır. Özellikle türbin hızlanmasının kritik durumlar yaratabileceği yük atma ve ani yük atma durumlarında türbin hız artışının kontrol altında



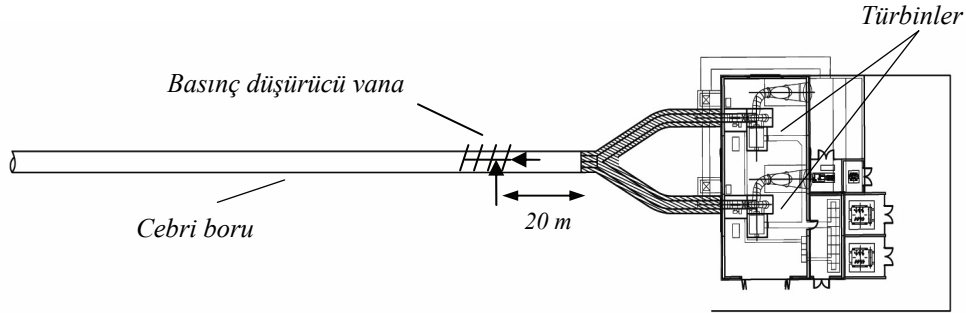
Şekil 2. Senaryo A için;
(a) Türbin kapanma eğrisi, (b) Türbinlerin giriş basınç yüksekliği, (c) Türbinlerin hız artışı

tutulmasını sağlar. Senaryoda su darbesi anında volan çarkı etkisini ve farklı atalet momentlerinin sonuçlarını incelemek için iki farklı çarkla, iki ayrı analiz yapılmıştır. İnşa edilen santralin türbin ve jeneratörünün toplam atalet momenti 4800 kg.m^2 iken eklenen iki volan çarkının atalet momentleri 1200 kg.m^2 ve 7200 kg.m^2 'dir. Bunlardan ilkinin makul ve uygulanabilir olmasına karşın ikincisinin GD^2 değeri volan çarkı etkisinin gözlemlenebilmesi amacıyla imgeseldir. Burada G dönen parçanın ağırlığı, D ise dönen kütlelin yarıçapıdır. Senaryonun su darbesi analizi sonuçları türbin kapanma eğrisiyle beraber Şekil 2.'de gösterilmiştir. Sonuçlara göre türbin kapanmasının başladığı andan itibaren türbin girişindeki basınç yüksekliği aniden artmakta, maksimum değerine ulaştıktan sonra ise sert bir biçimde düşmektedir. Türbin önündeki bu basınç değişimi ise türbinin hız artımı ile karşılanmaktadır.

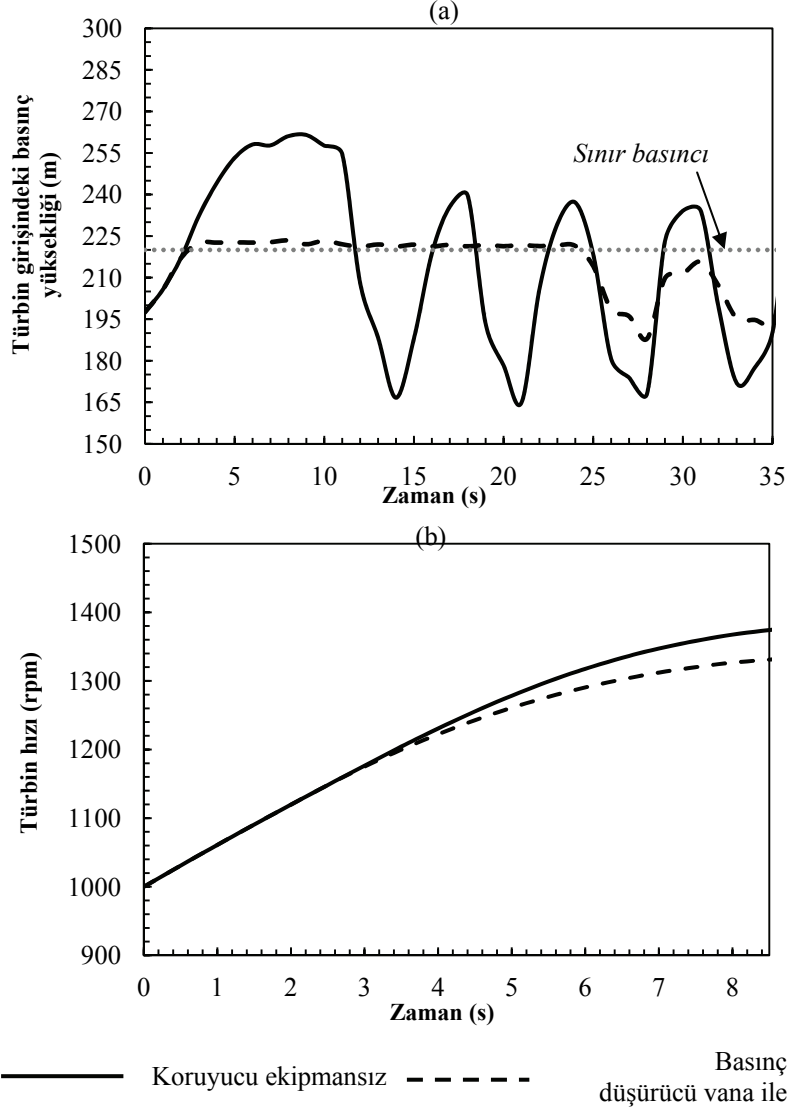
Sonuçlardan açıkça görülebildiği üzere, volan çarkı su darbesi anında türbin hızında büyük ölçüde düşüş sağlamaktadır. Bu düşüş küçük ataletle sahip çarkta % 5 iken büyük ataletli çarkta % 15 olmaktadır. Su darbesi anında oluşan basıncın maksimum ve minimum değerlerinde ise göze alınacak bir değişim gözlenmemektedir.

3.2. Senaryo B: Basınç Düşürücü Vana (BDV) Etkisiyle Ani Yük Atma Durumu

Bu koruyucu ekipman önceden tanımlı bir basınçta açılmak üzere bir yay ya da ağırlıkla yüklenmiş vanalardır. Cebri boru içindeki basınç su darbesi anında tanımlı bir limit basıncın üzerine çıktığında vana açılır ve dışarıya boru akımının bir kısmının deşarj edilmesiyle su darbesi anında yüksek basınçların oluşması engellenir. Çalışmadaki sisteme, ana cebri boru üzerine, branşmandan 20 m uzaklığa bir basınç düşürücü vana yerleştirilmiştir. Koruyucu ekipmanın cebri boru üzerindeki yeri Şekil 3.'de gösterilmiştir. Seçilen vana yayla sıkıştırılan tiptir ve limit basınç değeri 220 mss (metre su sütunu) olarak ayarlanmıştır.



Şekil 3. Basınç düşürücü vananın konumu ve santral binasının plan görünümü



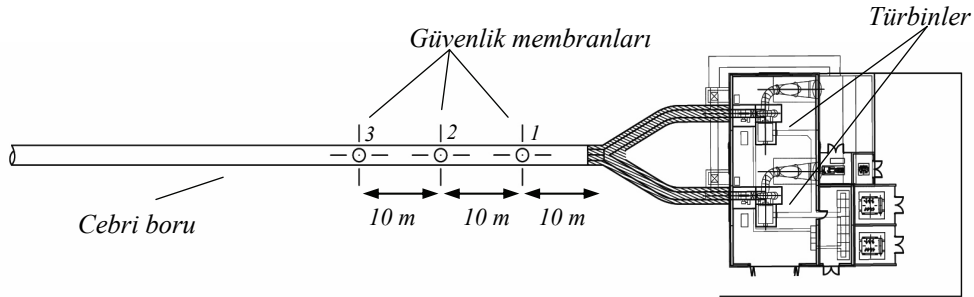
Şekil 4. Senaryo B için;
(a) Türbinlerin giriş basınç yüksekliği; (b) Türbinlerin hız artışı

Yapılan su darbesi analizleri sonunda elde edilen türbin önündeki basınç yüksekliği-zaman ve türbin hızı-zaman grafikleri Şekil 4.'te verilmiştir. Türbinler kapanmaya başlamadan önce BDV kapalı konumdadır. Ani yük atma durumunu takiben türbin akım ayar kanatları kapanmaya başlamakta ve boruda su darbesi basınçları oluşmaktadır. Kapanma başladıktan 3 saniye sonra vanadaki basınç 220 m'yi geçmekte ve BDV'nin açılmasına sebep olmaktadır. Toplam 22 saniye boyunca açık kalan BDV'den deşarj edilen boru akımıyla

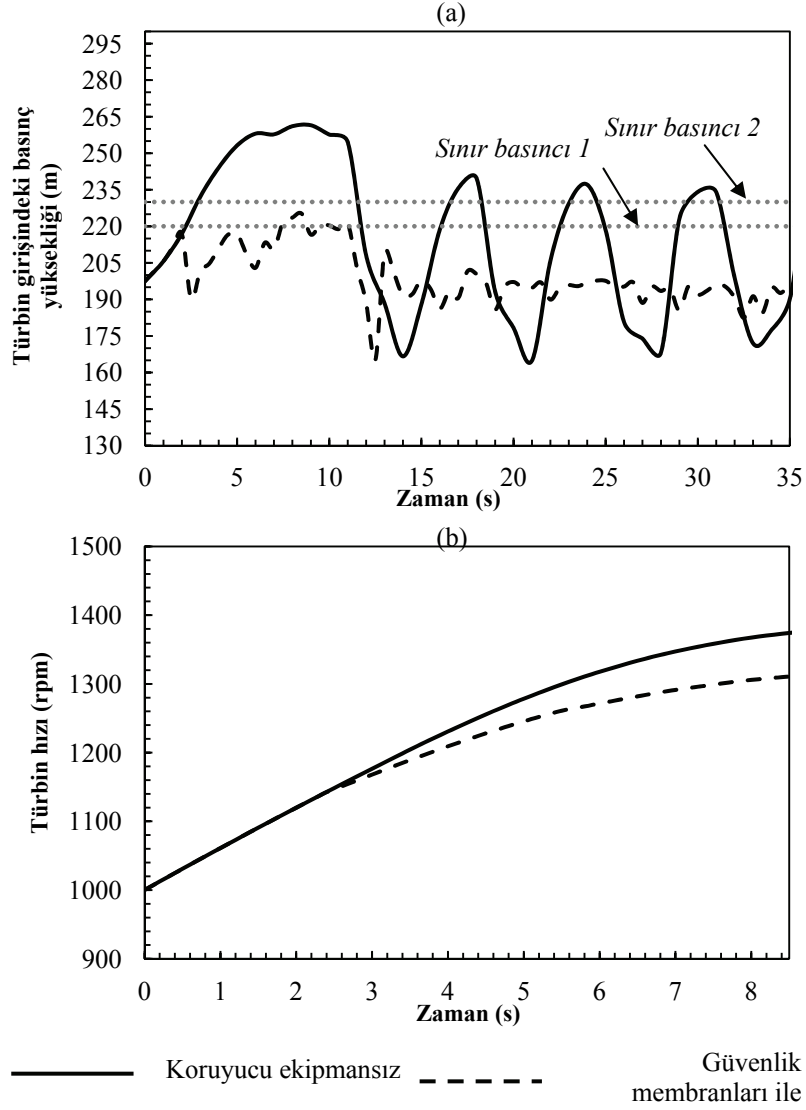
boru içindeki basınç yüksekliği sınır basıncı civarında, 222 m'de tutulabilmiştir. Su darbesi basınçları sönümlenmeye başladığında ve BDV'deki basınç, limit basıncın altına düştüğü anda ($t=24$ s) BDV kapanmıştır. Bu kapanmayı takiben cebri borudaki basınç sönümlenene kadar hafifçe dalgalanmasına devam etmiştir. Bu senaryodaki sistemin hidrolik açıdan dengeli konuma gelmesinin korumasız sistemdekine göre daha hızlı olacağı açıktır. Ayrıca, su darbesi anında oluşan sadece maksimum basınç değil, minimum basınç da kontrol altında tutulmuştur. Koruyucu ekipmansız sistemde oluşan maksimum basınç yüksekliği bu önlem sayesinde % 15 azaltılmıştır. Dahası, su darbesi anındaki türbin hız artışının maksimum değerinde de yaklaşık % 4'lük bir azalma sağlanmıştır.

3.3. Senaryo C: Güvenlik Membranı Etkisiyle Ani Yük Atma Durumu

Yırtılma diskleri olarak da adlandırılan bu koruyucu önlem cebri boru malzemesinden daha zayıf bir malzemeden yapılarak cebri boru üzerine yerleştirilir. Çelik cebri borular için genellikle alüminyum membranlar tercih edilir. Membranın bulunduğu disk kontrollü bir zayıf nokta olup, gerektiği anda yırtılmak üzere belirli bir kalınlığa sahiptir. Cebri boru içindeki basınç önceden belirlenen limit basıncın üzerine çıktığında membran disk yırtılır ve boru içindeki akımın bir kısmının dışarıya deşarjı ile yüksek su darbesi basınçlarının oluşması engellenir. Basınç düşürücü vanaya alternatif olarak kullanılacak bu ekipmanlar yapılan nümerik analizlerde sanal olarak Erfelek HES'te ana cebri boru üzerine branşmandan 10 m uzaklıktan başlamak üzere, 10 m aralıklarla yerleştirilmişlerdir. Yapılan analizler sonucunda 300 mm çapa sahip toplam üç adet güvenlik membranının yerleştirilmesine karar verilmiştir. Birinci ve ikinci disklerin yırtılma ayar basıncı değeri 220 mss, üçüncününü ise 230 mss olarak belirlenmiştir. Cebri boru üzerindeki güvenlik membranlarının plan görünümü Şekil 5.'te verilmiştir. Bu kontrollü zayıf noktalar sınır basınçları aşıldıklarında sırayla patlamak üzere yerleştirilmişlerdir. İhtiyaç duyulduğunda, ilk olarak türbinlere en yakın olan 1 numaralı disk, daha sonra bu diskten deşarj edilen su miktarı yetersiz kaldığında ise sırasıyla diğerleri yırtılacaktır.



Şekil 5. Güvenlik membranlarının konumu ve santral binasının plan görünümü



Şekil 6. Senaryo C için;
(a) Türbinlerin giriş basınç yüksekliği; (b) Türbinlerin hız artışı

Şekil 6. (a) ve (b), su darbesi sırasında, sırasıyla türbinlerin önündeki basınç yüksekliğini ve türbin hız artışı göstermektedir. Belirlenen iki limit basıncı (220 mss ve 230 mss) şekil üzerinde “Sınır basıncı 1” ve “Sınır basıncı 2” olarak belirtilmiştir. Türbinlerin kapanmaya başlamasıyla birlikte cebri boruda oluşan su darbesi basıncı yüksekliği 2 saniye içinde ilk güvenlik membranının sınır basıncına kadar yükselmiş ve onun patlamasına neden olmuştur. Tahliye edilen bir miktar su, basıncın düşmesini sağlamıştır, fakat mabdan ve mansaptan yansıyan basınç dalgaları türbin önündeki basıncın tekrar yükselmesine ve ikinci

diskin de sınır basıncını aşarak patlamasına sebep olmuştur. Benzer bir biçimde bu diskten de salınan su, borudaki basıncı istenilen seviyeye düşürememiş ve üçüncü diskten de patlamasına neden olmuştur. Son diskten yırtılmasının ardından cebri borudaki su darbesi basınçları küçülmüş ve zamanla sönümlenmeye başlamıştır. Basınç yüksekliği-zaman grafiğinden anlaşılacağı üzere, güvenlik membranlarının her birinin yırtılmasının ardından basınç yüksekliği sert bir biçimde düşmektedir. Membranların kontrolsüz açık noktalar oluşu ve akımı atmosfere tahliye ettikten sonra kapanmaması buna neden olmaktadır. Bu koruyucu ekipmanın da su darbesi basınçlarının azaltılmasında önemli ölçüde etkili olduğunu analiz sonuçlarından çıkarmak mümkündür. Koruyucu ekipmansız sistemde oluşan maksimum basınç yüksekliği bu önlem sayesinde % 14 azaltılmıştır. Ayrıca, türbin hızındaki artış ise % 5 azaltılmıştır.

4. ANALİZ SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Senaryolarda kullanılan üç farklı koruyucu önlemin etkilerinin ortaya koyulması ve bu önlemlerin üstünlükleri ve/veya zayıflıklarının belirlenebilmesi amacıyla Çizelge 4. hazırlanmıştır. Bu çizelgede santralin koruyucu ekipman olmaksızın (uygulanan hali) yapılan su darbesi analizlerinin sonuçlarıyla üç koruyucu ekipmanın su darbesi analizleri sonuçları karşılaştırılmıştır. Ani yük atma durumu sonucu türbinlerin kapanmasıyla cebri boruda, türbin girişlerinde oluşan maksimum basınç yükseklikleri ve bu basınç yüksekliklerinin türbinlerin normal çalışma (ani yük atma öncesi durumu) basınç yüksekliklerine göre artış yüzdeleri verilmiştir. Yine türbinlerin kapanma sonucunda ulaştıkları maksimum hızlar ve bunların normal çalışma hızlarına göre artış oranları da çizelgede belirtilmiştir.

Çizelge 4. Koruyucu ekipmanların maksimum basınç ve türbin hızı üzerine olan etkilerinin karşılaştırılması

	Maksimum basınç yüksekliği (m)	Normale göre basınç yük. artış oranı (%)	Maksimum türbin hızı (rpm)	Normale göre türbin hızı artış oranı (%)
Koruyucu ekipmansız	261.5	32.1	1376.4	37.6
Ataleti $GD_g^2=1200$ $kg.m^2$ olan volan çarkı	261.1	32.0	1316.9	31.7
Ataleti $GD_g^2=7200$ $kg.m^2$ olan volan çarkı	268.1	35.5	1174.3	17.4
Basınç düşürücü vana	223.5	12.9	1332.7	33.3
Güvenlik membranı	225.2	13.8	1312.8	31.3

5. SONUÇLAR

Türkiye’de sayıları hızla artan nehir tipi hidroelektrik santrallerde su darbesi olayı göz önünde bulundurulması ve önemsenmesi gereken oldukça büyük bir problemdir. Nehir tipi santrallerde su darbesine karşı kullanılacak önlemlerin analizi bu çalışmada gerçekleştirilmiştir. Bu önlemler belirlenirken, alınan önlemin küçük hidroelektrik santrallere özgü, güvenilir, işletilmesi kolay, ekonomik ve bakım-onarım giderlerinin düşük olmasına dikkat edilmiştir. Kurgulanan senaryolar ile üç farklı koruyucu önlemlerle, işletme halinde olan bir hidroelektrik santralin su darbesi analizleri yapılmıştır. Yapılan bu analizlere göre elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Nehir tipi HES’lerde volan çarkı kullanılmasıyla su darbesi anında görülen türbin hız artışı önemli derecede azaltılabilir. Bu koruyucu yöntem cebri boruda oluşan su darbesi basınçlarını azaltıcı bir etki göstermemektedir. Volan çarkı hidroelektrik santraldeki mekanik ekipmanları korumaya yönelik bir donanımdır. Bu araçla güvenli bir işletme sağlanmasının yanı sıra mekanik aksamın bakım onarım ve arıza giderleri azaltılabilir, hatta ömürleri uzatılabilir.
- Basınç düşürücü vanalar su darbesi anında cebri boruda oluşan basınçları azaltmada oldukça etkilidir. Analiz sonuçları bu koruyucu önlemin küçük hidroelektrik santrallerde tek başına koruyucu bir araç olarak kullanılabileceğini göstermiştir. Bu tip vanaların türbin hız artışlarına olan etkisi azdır.
- Güvenlik membranları da su darbesinin oluşturabileceği maksimum basınç değerlerinin azaltılmasında büyük rol oynamaktadır. Vanalar gibi türbin hız artışını azaltıcı etkileri azdır. Nehir tipi HES’lerde tek başına koruyucu bir araç olarak kullanılabilir.
- Hem basınç düşürücü vana hem de güvenlik membranı nehir tipi hidroelektrik santrallerde kullanılmaları pek ekonomik olmayan denge bacası ya da hava odacığı gibi önlemlerin yerine tercih edilebilir.

Semboller

A	: Cebri boru enkesit alanı, (m ²)
a	: Basınç dalgası yayılma hızı, (m/s)
B	: Boru karakteristik empedansı
C ⁺	: Pozitif karakteristik eğrisi
C ⁻	: Negatif karakteristik eğrisi
D	: Cebri boru iç çapı, (m)
f	: Darcy Weisbah sürtünme katsayısı
F	: Yer çekimi ivmesi ve kayma gerilmesini içeren kuvvet terimi
g	: Yerçekimi ivmesi, (m/s ²)
H	: Cebri borudaki basınç yüksekliği, (m)

P	: Basınç, (N/m ²)
Q	: Debi, (m ³ /s)
R	: Cebri boru direnç katsayısı
V	: Hız, (m/s)
θ	: Cebri borunun yatay eksenle yaptığı açı
ρ	: Akışkanın yoğunluğu, (kg/m ³)
τ_w	: Cebri boru cidarındaki kayma gerilmesi, (N/m ²)

Kaynaklar

- [1] Adamkowski, A., Case Study: Lapino Powerplant Penstock Failure, ASCE Journal of Hydraulic Engineering, 127(7), 541-555, 2001
- [2] Bergant, A., Simpson, A.R., Tijsseling A.S., Water Hammer With Column Separation: A Review of Research in the Twentieth Century, Centre for Analysis Scientific Computing and Applications, Eindhoven, 2004
- [3] Çalamak, M., Investigation of Waterhammer Problems in the Penstocks of Small Hydropower Plants, Yüksek Lisans, Orta Doğu Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, 2010
- [4] Hovey, L. M., Optimum Adjustment of Hydro Governors on Mantoba Hydro System, American Institute of Electrical Engineers, 81(3), 581-586, 1962
- [5] Hagihara, S., Yokota, H., Goda, K., Isobe, K., Stability of a Hydraulic Turbine Generating Unit Controlled by P.I.D. Governor, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 98(6), 2294-2298, 1979
- [6] Jimenez, O. F., Chaudhry, M. H., Stability Limits of Hydroelectric Power Plants, ASCE Journal of Energy Engineering, 113(2), 50-60, 1987
- [7] Peicheng, H., Pusheng, Z., Elkouh, A. F., Relief Valve and Safety Membrane Arrangement in Lieu of Surge Tank, ASCE Journal of Energy Engineering, 115(2), 78-83, 1989
- [8] Ni, F., Hu, P., Wang, Q., Numerical Simulation of Hydraulic Transients in Hydropower Plant Using Safety Membranes, ASCE Journal of Hydraulic Engineering, 122(6), 298-300, 1996
- [9] Ramos, H., Almeida, B., Parametric Analysis of Water-Hammer Effects in Small Hydropower Schemes, ASCE Journal of Hydraulic Engineering, 128(7), 689-696, 2002
- [10] Selek, B., Kırkgöz, M. S., Selek, Z., Comparison of computed water hammer pressures with test results for the Çatalan power plant in Turkey, Canadian Journal of Civil Engineering, 31(1), 78-85, 2004

- [11] Karadzic, U., Bergant, A., Vukoslavcevic, P., A Novel Pelton Turbine Model for Water Hammer Analysis, *Strojnicki vestnik - Journal of Mechanical Engineering*, 55(6), 369-380, 2009
- [12] Vakil, A., Firoozabadi, B., Investigation of Valve-Closing Law on the Maximum Head Rise of a Hydropower Plant, *Scientia Iranica Mechanical Engineering*, 16(3), 222-228, 2009