



Fotovoltaik (PV) - Pompa Güçlü Hidroelektrik Enerji Depolama Sistemleri için Deneysel Bir Performans Karakterizasyonu

Experimental Performance Characterization for Photovoltaic (PV) – Pump Powered Hydroelectric Energy Storage Systems

Özcan ATLAM¹ , Begüm BAY^{2,*} , Gökhan DÜNDAR³ 

¹ Enerji Sistemleri Mühendisliği, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, **Orcid:** 0000-0002-8639-1078

² Enerji Sistemleri Mühendisliği, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, **Orcid:** 0000-0001-7318-5104

³ Enerji Sistemleri Mühendisliği, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, **Orcid:** 0000-0003-1028-5161

Araştırma Makalesi

Gönderilme Tarihi : 11/12/2019

Kabul Tarihi : 02/03/2020

Anahtar Kelimeler

Hidroelektrik
PV
Sistem Verimi
Yenilenebilir Enerji Depolama

Özet

Bu çalışmada PV(fotovoltaik) pompa hidroelektrik enerji depolama sistemlerinin (PVPHS) performans karakterizasyonları için laboratuvar içi küçük ölçekli bir deney seti hazırlanmıştır. Bu set PV, sabit mıknatıslı fırçasız DC motorlu santrifüj pompa sistemi, farklı basma yükseklik girişlerine imkan veren su haznesi ve depo edilen sudan elektrik enerjisi çevrimi için basit bir sabit mıknatıslı su türbinli jeneratörden oluşmaktadır. Çalışmada sistem elemanlarının performans model ve verim tanımlamaları yapılmaktadır. PV-pompa sistemi için farklı ışınımlarda ve farklı basma yüksekliklerindeki debi performansları, pompanın elektriksel giriş değerlerine göre karakterize edilmektedir. Örneklenen her bir ışınım seviyesine karşılık pompaj veriminin en iyi olduğu kritik bir yükseklik oluşmaktadır. Hidroelektrik depolama için verim değişimleri incelenmektedir. Depolanan sudan hidroelektrik çevrim için farklı düşü yüksekliklerinde performans karakterizasyonu yapılmaktadır. Hidroelektrik enerji çevrim verimi için jeneratör uçlarındaki yük sabit tutularak su türbininin en iyi verimi aldığı kritik bir düşü yüksekliğinin olduğu gözlenmektedir. PV'den pompa motoruna maksimum güç transfer durumu, pompa verimi, seçilecek bir güçteki kritik basma yüksekliği, hidroelektrik sistem için belirli çalışma aralığındaki en uygun su türbin devrinin jeneratöre uygulanacak mekanik güçte etkili olduğu deneysel sonuçlarla tanıtılmaktadır. Çalışma aralığında sistemden elde edilen hidroelektrik güç, doğrusala oldukça yakın azalan eksponansiyel bir karakteristik göstermektedir. Bu çalışmadaki sonuçlar büyük ölçekli PVPHS'lerin performans optimizasyonları bakımından bir referans olabilir.

Research Paper

Received Date : 11/12/2019

Accepted Date : 02/03/2020

Keywords

Hydroelectric
PV
System Efficiency
Renewable Energy Storage

Abstract

In this study, an in-laboratory small scale experimental setup was prepared for performance characterization of PV (photovoltaic) pump hydroelectric energy storage systems (PVPHS). The setup consists of a PV panel, a permanent magnet brushless DC motor run centrifugal pump, a water reservoir with different input heads and DC generator with water turbine. Performance model and efficiency definitions of system elements are derived. For different irradiance conditions and pumping head levels, flow rate values are investigated according to motor electrical inputs. The critical pumping head is observed for a sampled irradiance level in order to maximize hydro storage efficiency. This is important in terms of the efficiency of the PHS, as well as pump efficiency and power transfer cases between PV and pump motor. On the other hand, generated electric power variations are tested at different hydroelectric heads when the generator load is kept. According to hydroelectric test results, there is a critical head at which the hydroelectric conversion efficiency is the highest. For hydroelectric power generation section within the working range, available power shows non-linear decreasing characteristics very close to linear characteristics. The results of this study can be reference in terms of performance optimizations of large-scale PVPHS's.

1. Giriş

Günümüzde, yenilenebilir enerjili elektrik üretim sistemleri, kolay temin edilmeleri, temiz ve sürdürülebilir olmaları nedeniyle güncelliklerini korumaktadır.

Rüzgar, güneş gibi yenilenebilir enerjili elektrik üretim sistemlerine, temiz, doğal ve kolay erişimleri bakımından ilgi artmakta ve bu tür kaynakların kullanımı güncelliğini korumaktadır. Fakat yenilenebilir enerji kaynakları doğal olarak kesintili ve değişen güç yoğunluğunda gelmektedir. Bu tür elektrik üretim sistemleri, belirli bir periyotta kararlı

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author): begumbay@gmail.com



bir güç üretimi için entegre halde çalışabilecek enerji depolama aygıtlarına ihtiyaç duymaktadırlar. Bataryalar, süper kapasitörler, yakıt pillerinin kullandığı hidrojen depolama, volan, basınçlı hava depolama başlıca depolama aygıtlarıdır [1], [2]. Özellikle yaygın ve ilk akla gelen bataryalar düşünüldüğünde, büyük ölçekli güç sistemleri için enerji depolama aygıtı olarak yüksek kapasiteli ve çok sayıda bataryaya ihtiyaç vardır [3]. Bataryaların kullanım süreleri boyunca şarj, deşarj verimleri düşmekte, üretimlerindeki hammadde temini ve maliyetleri yanında atık problemleri ayrıca zorluk teşkil etmektedir. Alternatif olarak özellikle belirli bir süre aralığında daha büyük ve kararlı bir güç üretimi için, birincil yenilenebilir enerji kaynağıyla çalışan pompalar aracılığıyla uygun bir haznede suya belirli bir potansiyel enerji kazandırılmasına dayanan hidroelektrik enerji depolama, sürdürülebilir bir yöntem olabilir [4]. Kesintili ve değişen güçlü birincil yenilenebilir enerji kaynağının anlık performansına bağlı olarak pompalar belirli bir yükseklikteki hazneye suyu depolar. İstenilen bir güç talebinde su aşağı akıtılarak kazandığı kinetik enerjiyle su türbin/ jeneratörlü hidroelektrik sistem devreye girer. Hidroelektrik eskiden beri bilinen bir enerji çevrim yöntemi olmasına rağmen gerek güç ayarlamasında gerekse istenilen şebeke frekans ve gerilime adapte edilebilmelerindeki esneklik, oldukça işe yarar. Hidroelektrik çıkışındaki su tekrar kaynağına döndürüldüğünde, çevrim yeniden başlar. Hatta yedek su hazneleri ile sürdürülebilirlik daha etkin hale gelebilir. Diğer yandan, nehir yataklarına kurulan bilinen hidroelektrik sistem yapılarının doğal çevrede oluşturabileceği problemler, kıyı bölgelerde doğrudan deniz suyunu kullanan yapay su hazneli hidroelektrik enerji depolama sistemleri ile aşılabılır [5]. Nitekim denizlerdeki dalga ve gelgit enerjili elektrik çevrim sistemleri de suyun anlık kinetik veya potansiyel enerjisini kullanır veya depo eder. Bu bakımdan prensip olarak hidroelektrik çevrimli depolama sistemine benzerlik gösterdiği düşünülebilir. Pompa yolu ile hidroelektrik enerji depolama sistemlerinde rüzgar türbinleri, fotovoltaik güneş panellerini (PV) veya bu tür kaynakların birlikte kullanıldığı hibrit yapılar kullanılabilir. Yenilenebilir birincil kaynak verileri ve sistemin içerdiği ekipmanların çevrim verimlerine göre uygun optimizasyon ve planlama çalışmaları önerilmektedir [6]–[10].

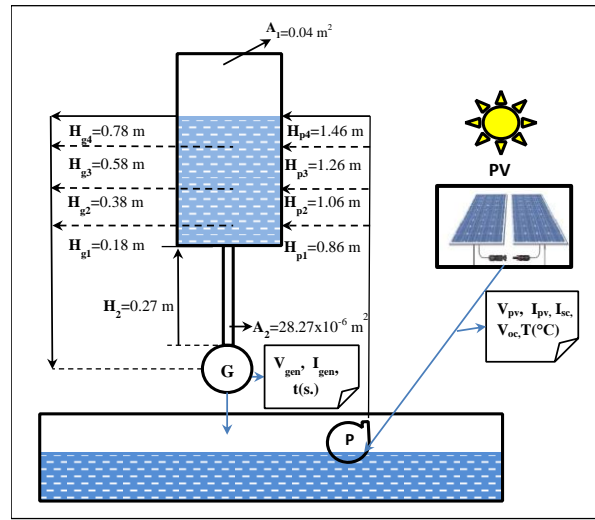
Tipik bir PV pompa hidroelektrik enerji depolama sistemi (PVPHS) için PV 'den başlayan hidroelektrik türbin/jeneratöre kadar, sistem elemanlarının performansları ile ilgili çeşitli parametreler vardır. Her bir alt elemanın performansı böyle bir sistemde çevrim ve depolama veriminde etkili olacaktır. PV kullanıldığı için ışınım enerjisi verileri ve değişen ışınımlardaki sistem performansları en üst düzeyde tutulması amaçlanabilir. Örneğin; hidroelektrik pompa sisteminin yüksekliği ile

depo edilen potansiyel enerji artabilir. Fakat ilgili yüksekliğe su basmak için daha yüksek pompa gücüne de ihtiyaç olacaktır. Böylece öngörülen enerji depolama için, sistem boyutlandırılması değişen geniş bir ışınım aralığındaki performanslar düşünülerek yapılabilir.

Bu çalışmada ise laboratuvar içi örnek deneysel bir set hazırlanarak, PVPHS için bazı performans karakteristikleri incelenerek benzer planlamalarda yardımcı olabilecek çıkarımlar sunulmaktadır. İlgili bölümler aşağıdadır.

2. Deneysel Sistemi

PVPHS'lerin çalışma prensiplerini anlamak ve değişkenlerin (yükseklik, debi, güç, verim vb.) sistem üzerine etkilerini incelemek amacıyla laboratuvar ortamında bir deneysel seti kurulmuştur. Setin prensip şekli Şekil 1'dedir.



Şekil 1. Deneysel setin prensip şeması

PVPHS sistemlerinin farklı ışınım, farklı su basma yükseklikleri, farklı düşü yüksekliklerine göre performans karakterizasyonları için laboratuvar içi örnek bir set hazırlanmıştır. Bu setin görseli Şekil 2'dedir. Sistem performans model yaklaşımları ölçülen değerlerle uyumludur. Set çok küçük ölçekli ve düşük verimli (iç kayıpları elektrik ve mekanik sürtünme fazla) olmasına rağmen, gerçekte mühendislik uygulamalarında daha yüksek güç kapasiteli ve verimli pompalar, jeneratörler ve türbinlerin kullanılacağı uygulamaların planlanmasında önemli karakterizasyon ve gerekli optimizasyon kriterleri vermektedir.

Deneysel sistemde, uygun bir su rezervuarı farklı yüksekliklerde basılan suyun debi performansını ve farklı yüksekliklerden aşağı akan suyun hidroelektrik sistemdeki performansını araştırmak için kademeli girişler halinde şekillendirilmiştir. PV-pompa hattında suyu pompalamak için 8mm'lik silikon bir boru kullanılmıştır. Güneş ışığını

simüle edecek şekilde ışık şiddeti ayarlanabilen bir halojen lamba ile farklı ışınım şiddetlerinde PV-pompa sistemi çalıştırılabilmektedir. Su rezervuarındaki ölçek belirteçleri ile debi miktarları ve tankın dolma veya bitme süreleri ölçülebilmektedir. Deneysel çalışmada kullanılan ölçü aleti ve sistem elemanlarına ait temel bilgileri Tablo 1’de verilmektedir.



Şekil 2. Deneysel seti görseli

Tablo 1. Sistem elemanlarının teknik verileri

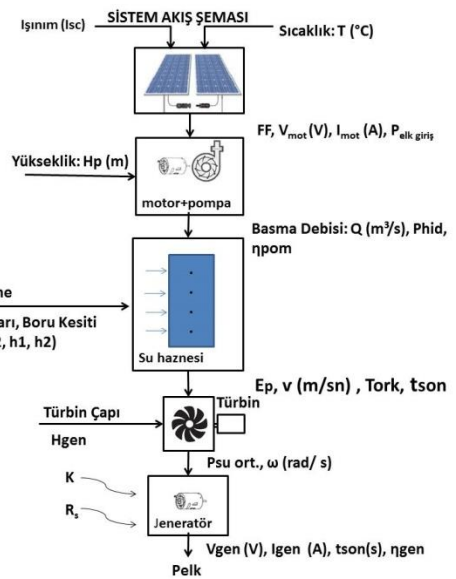
PV Panel	
Panel Adedi	2
Bağlantı Şekli	Paralel
Referans Sıcaklık (T_{ref})(°C)	25 °C
I_{maxpv} (Tek panel için)	0,57 A
V_{maxpv} (Tek panel için)	17,5 V
V_{ocpv} (Tek panel için)	22V
I_{scpv} (Tek panel için)	0,62 A
K_p	18.82
Pompa Motoru	
Nominal Değerler	12 V, 5W, $H_{max}= 300$ cm, $Q_{maxp}= 240$ l/h
Pompa Tipi	Dalgıç Tipi
Pompa Motoru	Fırçasız DC Motor
H_{p1} (suyun basma yüksekliği)	0.86 m
H_{p2} (suyun basma yüksekliği)	1.06 m
H_{p3} (suyun basma yüksekliği)	1.26 m
H_{p4} (suyun basma yüksekliği)	1.46 m

Tablo 1. (Devam) Sistem elemanlarının teknik verileri

Türbin Jeneratörü	
Türbin	Su Tekerli, Yarıçap= 2,5 cm, Derinlik= 15 mm, Genişlik= 15 mm, Kanat Sayısı= 20
R_s	16,8 Ω
K_{gen}	0.0202Nm/A
$\omega=400$ devir/dk için	0,82 V
$\omega=1200$ devir/dk için	2,61 V
H_{g4} (suyun boruya kadar uzunluğu)	0.78 m
H_{g3} (suyun boruya kadar uzunluğu)	0.58 m
H_{g2} (suyun boruya kadar uzunluğu)	0.38 m
H_{g1} (suyun boruya kadar uzunluğu)	0.18 m
H_2 (boru uzunluğu)	0.27
Ölçü Aletleri	
Dijital Multimetre	DC Voltaj: (\pm % 0.8 hassasiyet) DC Akım: (\pm % 1.0 hassasiyet)
Extech AN200 Anemometre ve Kızılötesi Termometre	-10...60°C, 0,1°C çözünürlük, $\pm 3^\circ C$ hassasiyet

3. Modelleme

Sistem performans tanımlamalarında Şekil 3’deki prensip akış diyagramı kullanılmaktadır.



Şekil 3. Sistem akış diyagramı

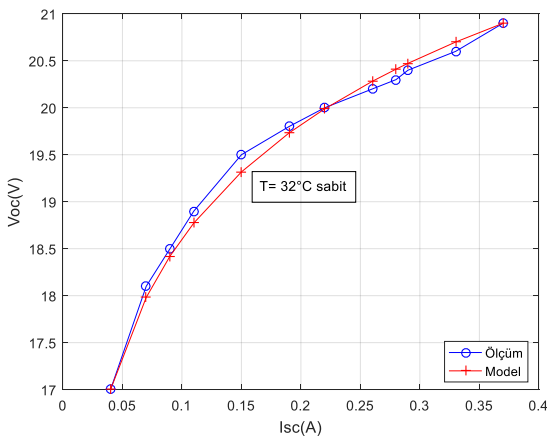
Tipik bir PV'nin elektriksel karakteristikleri ışınım ve sıcaklıkla değişir ve ilgili ışınım için doğrusal olmayan çıkış akım- gerilim karakteristiği gösterir. PV'nin farklı ışınım ve sıcaklıklardaki çıkış akım- gerilim (I-V) modeli için [11]'deki PV model aşamaları çalışmada kullanılan PV modellenmesi için uyarlanmıştır. Buna göre;

$$V_{oc}(I_{sc}, T) = V_{oc}(I_{sc}, T_{ref}) + dvt(T - T_{ref}) \quad (1)$$

$$V_{oc}(I_{sc}, T) = 17 + 1,75 \ln\left(\frac{I_{sc}}{0,04}\right) \quad (2)$$

$$I_{pv} = (I_{sc} - 0,002V_{pv})\left[1 - e^{18,82\left(\frac{V_{pv}}{V_{oc}(I_{sc}, T)} - 1\right)}\right] \quad (3)$$

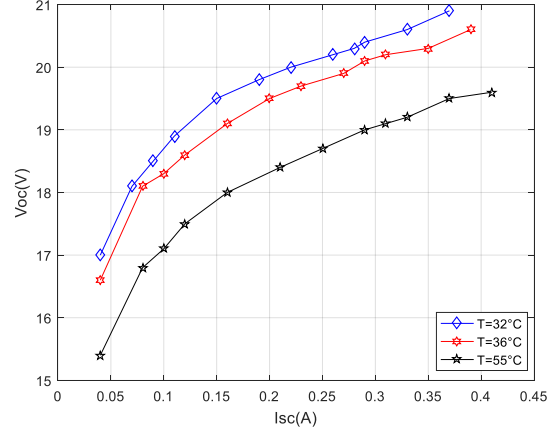
Eş. (1) ve Eş. 2'de T sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$), I_{sc} kısa devre akımı (A.), V_{oc} açık devre gerilimi (V.), I_{pv} çıkış akımı (A.), V_{pv} terminal gerilimi (V.), dvt birim sıcaklık değişimi başına gerilimdeki azalma çarpanıdır. Bu çalışmada PV modellenmesinde referans sıcaklık $T_{ref} = 32^{\circ}\text{C}$, $dvt = -0,057$ 'dir. I_{sc} terimi güneş ışınım şiddeti ile doğrusal değişmekte T sıcaklığı ile çok az artış gösterir. Oysa V_{oc} terimi ışınım şiddeti ile (dolayısıyla I_{sc} ile) logaritmik artarken, T sıcaklığı ile doğrusal azalmaktadır. Yapılan çalışmadaki PV çıkış I-V karakteristik profillerinde, ilgili ışınım şartlarında kısa devre bölgesinden akımın devrilme bölgesi arasındaki PV iç direnç yapısı ve kontak dirençleri nedeniyle oluşan eğim için Eş. (3) ile model zenginleştirilmiştir. Şekil 3'te $T=32^{\circ}\text{C}$ 'deki $I_{sc}-V_{oc}$ değişimi deneysel ve model tahmini olarak örnek olarak verilmiştir. Farklı T sıcaklıklarındaki $I_{sc} - V_{oc}$ değişimleri Şekil 4'teki ile benzer karakteristik yapıda fakat daha yüksek sıcaklıklarda daha düşük seviyelerde seyretmektedir. Bu durum Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 4. $T=32^{\circ}\text{C}$ 'deki $I_{sc}-V_{oc}$ değişimi (model ve deneysel)

Sabit mıknatıslı DC motor –merkezkaç pompa mekanik yükü sistemlerinde, pompa mekanik yük torku hızın bir fonksiyonu şeklinde değişir. Bu çalışmada motor pompaya doğrudan bağlantılıdır. Belirli bir elektriksel I akımı ile sağlanan tork değişimlerinde devir logaritmik olarak

değişir. Devir ise, belirli bir pompa pervane yapısı ve basma yüksekliği için boru hat kayıplarının da etkilediği debi ile doğru orantılı olarak kabul edilebilir. Motor-pompa sisteminin sürekli durum tork eşitliği Eş. (4) ile tanımlanabilir.



Şekil 5. Farklı sıcaklıklarda ölçülen $I_{sc}-V_{oc}$ karakteristikleri

$$K \cdot I_{mot} = T_0 + b\omega + k_{pom}\omega^n, \quad (n \geq 1) \quad (4)$$

Burada I_{mot} motor akımı (A), $K =$ elektromagnetik tork çarpanı (N.m/A veya V/(rad/s))'dir. T_0 (N.m) ve b (N.m/(rad/s)) sırasıyla statik ve dinamik sistem mekanik sürtünme çarpanları, k_{pom} ise pompa yükü tork çarpanı (N.m/(rad/s) n) ve ω açısal hızdır (rad/s). Diğer yandan Eş. (4)'teki tork ifadeleri kullanılarak motorun herhangi bir koşuldaki giriş I-V ilişkisi Eş. (5) ile tanımlanmaktadır.

$$V_{mot} = I_{mot} \cdot R_a + K \cdot \omega \cong I_{mot} \cdot R_a + K \left[\frac{K \cdot I_{mot}}{k_{pom}} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (5)$$

Su pompa yüklü bir motor Eş. (5)'teki ifadeye göre doğrusal olmayan bir I-V giriş karakteristiğine sahiptir.

$$\begin{aligned} P_{elk.giriş} &= V_{mot} \cdot I_{mot} = I_{mot}^2 \cdot R_a + K \cdot \omega \cdot I_{mot} \\ &= I_{mot}^2 \cdot R_a + \left[T_0 \cdot \omega + b \cdot \omega^2 + k_{pom} \omega^{n+1} \right] \\ &= P_{elk.iç.kayıp} + P_{mek.iç.kayıp} + P_{boru} + P_{hid}. \end{aligned} \quad (6)$$

Yukarıda R_a armatür sargı direnci (ohm), P_{boru} boru hat kaybı, $P_{elk.iç.kayıp}$ iç kayıpları (W), $P_{mek.iç.kayıp}$ mekanik iç kayıpları (W) ve P_{hid} su basmadaki kullanılan statik güçtür (W). P_{hid} Eş. (7) ile ifade edilebilir. Pompa verimi η_{pom} ise Eş. (8)'de yer almaktadır. Eş. (7) ve Eş. (8)'de g yerçekimi ivmesidir (9,81 m/s 2).

$$P_{hid} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H_p \quad (7)$$

$$\eta_{pom} = \frac{P_{hid}}{P_{elk.giriş}} = \frac{\rho \cdot Q \cdot g \cdot H_p}{I_{mot} \cdot V_{mot}} \quad (8)$$

Diğer yandan hidroelektrik sistem için potansiyel enerji E_p (J.) aşağıda yer alan Eş. (9) ile tanımlanmaktadır.

$$E_p = m \cdot g \cdot h_{gen} = (\rho \cdot A_1 \cdot h_1) \cdot g \cdot [h_2 + \frac{h_1}{2}] \quad (9)$$

Burada m su haznesindeki toplam depolanan su kütlesi (kg), A_1 düzgün geometri haznenin kesit alanı (m^2), ρ yoğunluk (kg/m^3), h_1 tankın su dolu olan yükseklik (m) ve h_2 boru uzunluğu (m)dur. Su haznesindeki suyun tamamının bitme süresi teorik olarak t_{son} (s.) Eş. (10)'da ifade edilmiştir.

$$t_{son} = \frac{A_1}{A_2} \cdot \sqrt{\frac{2h_1}{g}} \quad (10)$$

Verilen tank ve boru boyutları için t_{son} süresi esnasında hidroelektrik güç çevrimi yapılması öngörülmektedir.

Böylece t_{son} süresi içerisinde elde edilebilecek su türbini ortalama giriş gücü P_{suort} (W) Eş. (11) ile tanımlanmaktadır.

$$P_{suort} = \frac{E_p}{t_{son}} \quad (11)$$

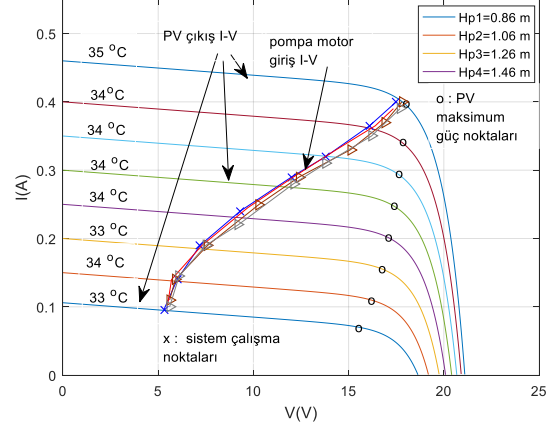
Su türbin verimi, mekanik sürtünme kayıpları ve suyu taşıyan hattaki dirsek ve sapmalardaki hızın düşmesine neden olan kayıplar düşünüldüğünde jeneratör miline aktarılabilir net mekanik güç daha düşük olacaktır. Bu güç ayrıca jeneratör içindeki mekanik ve elektriksel güç kayıpları ile çıkış uçlarında daha da düşer. Ayrıca jeneratörün uçlardaki yük akımına bağlı olarak en uygun çalışma noktalarına ulaşmak için çıkış kesitinde debi ayarlamaları yapılabilmektedir. Böylece hidroelektrik çevrim verimi η_{gen} , jeneratörde dönüşen elektriksel enerji bakımından Eş. (12) ile tanımlanmaktadır.

$$\eta_{gen} = \frac{P_{elk} \cdot t_{son}}{E_p} = \frac{(I_{gen}^2 R_s + V_{gen} I_{gen}) \cdot t_{son}}{E_p} \quad (12)$$

4. Bulgular ve Tartışma

Bir önceki bölümde tanımlanan performans model denklemleri kullanılarak örnek PVPHS seti üzerinde bazı önemli performans karakterizasyonları deneysel olarak çıkarılmaktadır. Kullanılan PV paneli için örneklenen en yüksek ışınım seviyesinin %20 seviyesine kadar farklı ışınım şiddetlerinde, PV- pompa motor sistemi çalışma noktaları ($V_{mot}-I_{mot}$) ölçülmüştür. Bu ölçümler örneklenen her farklı pompa yüksekliği seviyesindeki çalışma esnasında kayıt altına alınmıştır. Böylece Eş. (5) ile karakteristik bakımdan uyumlu giriş $V_{mot}-I_{mot}$ karakteristikleri her su basma yüksekliği örneği için Şekil 5'te verilmektedir. Çalışma noktaları PV çıkış I-V eğrileri ile kesişen noktalar. Deney esnasındaki sıcaklık dalgalanmaları nedeniyle çok az sapmalar görülebilmektedir. Bu çalışma noktaları PV'den motora aktarılabilir Eş. (6)'daki $P_{elk.giriş}$ elektriksel gücü tanımlar. Belirli bir ışınım şartları altında, çalışma

noktalarının PV maksimum güç noktalarına yakınlık derecesi PV'den daha etkili faydalanma imkanı vermektedir. Şekil 6'da görüldüğü gibi motor giriş $V_{mot}-I_{mot}$ karakteristikleri (çalışma noktaları karakteristikleri) örneklenen basma yüksekliklerinde çok az değişme göstermektedir.

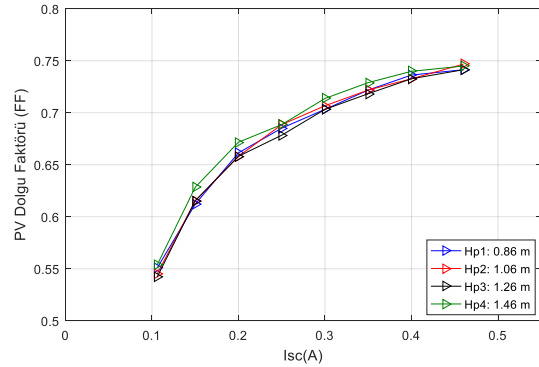


Şekil 6. PV çıkış ve pompa motoru çalışma noktaları

Ayrıca deney esnasında, aşağıdaki Eş. (13)'te tanımlanan PV'nin dolgu faktörü (FF) değerlerinin, değişen ışınım enerjisi koşullarındaki değişimleri her bir su basma yükseklikleri için Şekil 7'de belirlenmiştir.

$$FF = \frac{V_{pv(m)} \cdot I_{pv(m)}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (13)$$

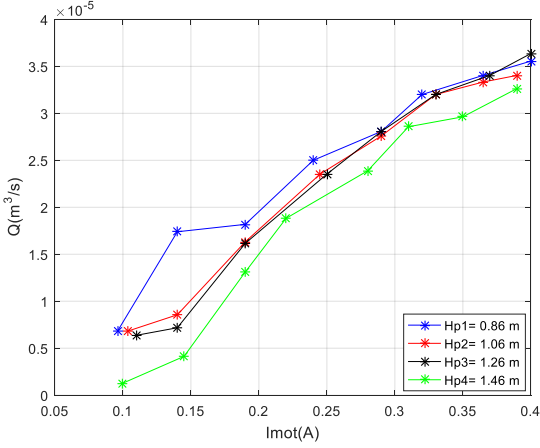
Eş. 13'te (m) indisi maksimum güçteki değerleri belirtir.



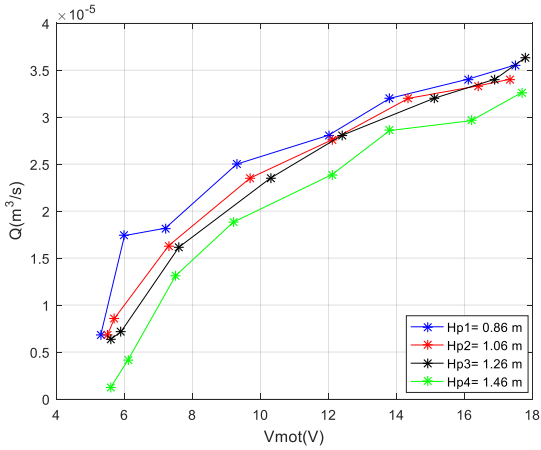
Şekil 7. PV'nin farklı ışınım koşullarında ve farklı su basma yüksekliklerindeki FF değişimleri

Deney setinde örneklendirilen her bir su basma yükseklikleri için, debi değerleri PV ile beslenen su pompa motorunun giriş akım, gerilim ve elektriksel giriş güçlerine göre her ışınım örnekleme için ölçülerek karakterize edilmiştir. Bu karakteristikler Şekil 8, Şekil 9 ve Şekil 10'dadır. Bu değişimler model denklemlerinin karakteristik yapıları ile uyumlu olarak logaritmiktir. Gerilim ile debinin logaritmik artışı ise motorun doğrusal olmayan giriş I-V karakteristik fonksiyonundan kaynaklanmaktadır. Güçlere göre debi değişimindeki

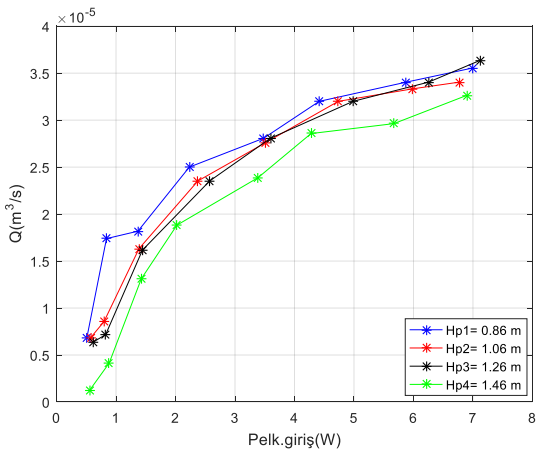
logaritmik özellik doğal olarak (akım ve gerilim bileşenlerinin çarpımı) daha belirgindir. Bu eğriler verilen bir elektrik bileşeni (akım, voltaj, giriş gücü) için öngörülen yükseklikte ne kadar debi ile su basılarak depolanabileceği konusunda önemli bir referans vermektedir.



Şekil 8. Pompa motoru giriş akımına göre debi değişimleri

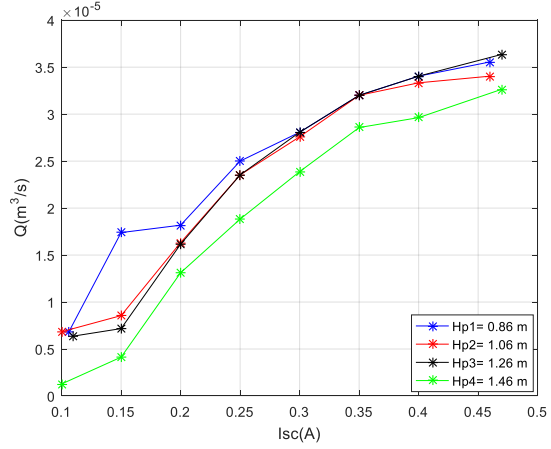


Şekil 9. Pompa motoru giriş gerilimine göre debi değişimleri



Şekil 10. Pompa motor giriş elektriksel güce göre debi değişimleri

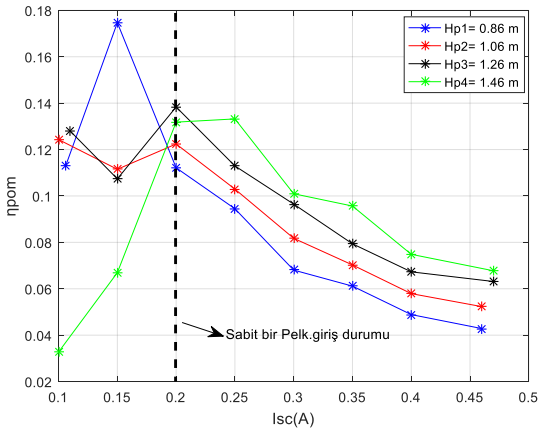
Benzer şekilde ışınım seviyelerine göre farklı yükseklikler için örnek sistemin debi karakteristikleri de Şekil 11'dedir. Ayrıca karakteristiklerden görüldüğü gibi artan yüksekliklerde daha düşük debiler alınmaktadır.



Şekil 11. Farklı ışınım seviyeleri ve basma yükseklikleri için debi değişimleri

Eş. (8) ile tanımlanan pompa verimi η_{pom} , ölçüm verileri kullanılarak farklı ışınım şiddetlerinde Şekil 12 ile karakterize edilmiştir. Şekil 12'e dikkat edildiğinde değişen ışınımlarda belirli bir basma yüksekliği için pompa veriminin en yüksek olduğu kritik bir ışınım değeri vardır. Düşük ışınım şiddetlerinin değişiminde debide yüksek değişiklikler meydana gelirken ışınım şiddetinin yükselmesi ile debideki değişim miktarı azalmakta ve yaklaşık %60 değerlerinden sonra platoya yakın bir eğilim göstermektedir. Şekil 11 incelendiğinde yaklaşık %40 ışınım şiddetine kadar ışınım şiddetinin iki katına çıkarılması debinin de iki katına çıkmasına sebep olurken %40 ışınım şiddetinin üzerinde bu artış miktarı azalmaktadır (logaritmik artış). Normalde tipik bir pompada tipine göre de değişen sabit bir giriş elektrik gücünde bir Q-h karakteristiği vardır. Bu karakteristik üzerinde Eş. (7) ile ifade edilen faydalı su basma gücünü maksimum yapan kritik debi ve yükseklik değerleri vardır. Bu sabit giriş elektrik gücünde artan yükseklikle debi düşme karakteristiği göstermektedir. Bu durum örneğin Şekil 10'da aynı ışınım şiddeti koşullarına karşılık gelen değişen yüksekliklerde debi değiştiği görülmektedir. Bu konuda aynı ışınım şiddeti koşulları sabit giriş gücü olarak kabul edilebilir. Herhangi bir pompa ilgili söz konusu sabit giriş gücünde en iyi verimi gösterdiği bir noktaya sahiptir. Bu çalışmada değişen ışınım ile bağlantılı olarak giriş güçleri değişmektedir. Bu güçlere karşılık gelen optimum yükseklik ve debi değerleri değişecektir. Böylece örneklenen yüksekliklerin bu sözü edilen belirli giriş gücündeki kritik yükseklik ve debi değerlerine yakın olanları daha yüksek verim gösterecektir. Şekil 12 incelendiğinde verimin ışınım şiddetiyle ters orantılı bir şekilde düştüğü görülmektedir. %10 ışınım şiddeti

azalmasına karşı yaklaşık %3 seviyesinde bir verim kaybı olduğu görülmektedir. Her ne kadar düşük ışınım şiddetleri verim açısından iyi gibi gözükse de istenen yüksekliğe suyu basamadığı sürece sistemin çalışması için asgari şartları sağlayamayacaktır. Bu durumun görülmesi bakımından sabit güçteki Q-h karakteristikleri testi yapılmamıştır. Fakat böyle uygulamalarda belirli giriş gücüne ve pompa tipine karşılık gelen kritik en iyi verimli debi ve yükseklik ayarlaması (optimizasyon) planlamalarda yapılırsa ön görülen şartlarda çok daha yüksek verim elde edilecektir. Böylece geniş bir ışınım aralığı bandında bu verimleri optimize edilmesi önemli olacaktır. Örneğin daha fazla potansiyel kazandırmak adına basma yüksekliği büyük seçilir ise bu durumda ilgili pompa sistemi düşük ışınım enerjilerinde su basamayabilir veya aktif su basabileceği aralık daralır. Bu enerji depolama performansı için önemli olacaktır.

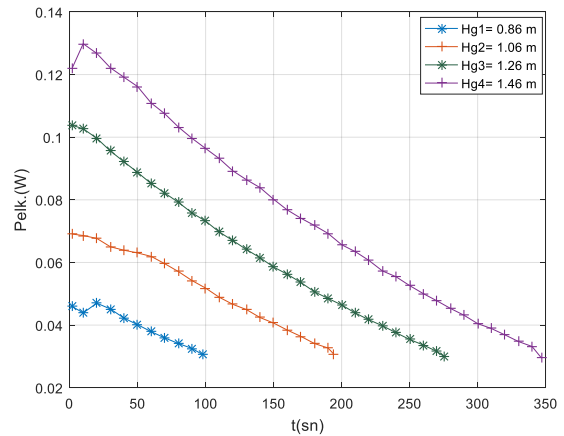


Şekil 12. Farklı yüksekliklerde ışınımlara göre pompa motorunun verimleri

Hidroelektrik kısmında ise depo edilmiş su farklı yüksekliklerden (Hg_1, Hg_2, Hg_3, Hg_4) düşürülerek su türbin jeneratör kısmına uygulanmaktadır. Deneyde kullanılan jeneratör yaklaşık iç direncinden biraz daha büyük ohmik yükte örnek olarak yüklenmiştir. Gerçekte böyle uygulamalarda talep edilen yüklenme durumlarına göre sabit hızda su girişleri ayarlanır. Bu çalışmada jeneratör yükü direnci karakterizasyonu için sabit tutulmuştur. Böylece belirli bir yük koşullarında farklı seviyelerde boşalan suyla sistemin nasıl davrandığı incelenmektedir. Belirli bir yükseklikteki haznedeki su bitme süresi aralığında jeneratörde dönüşen elektriksel güç değerleri kaydedilmiştir. Bu gücün bileşenleri olan akım ve gerilim değerlerinin zamana göre aldığı değerler kullanılarak Eş. (12)'de P_{elk} güç değerleri karakterize edilmiştir. Karakteristikler hidroelektrik sistemin kayıplarına bağlı olarak akım ve gerilim yaklaşık zamanla doğrusal azaldığı için bunların oluşturduğu elektriksel güç P_{elk} polinomsal bir karakteristiktir. Deney seti için Şekil 13'te görüldüğü gibi yaklaşık hazne boşaldıkça zamanla doğrusal bir

azalma gösterir. Şekil 13'te gösterilen sonuçlar deneyin başlangıcında yapılan ön görüler ile örtüşmektedir. Burada görülebileceği gibi güç ve haznenin boşalma süresi (enerji depolama süresi) yükseklik ile doğrusal şekilde artmaktadır ancak artış düşük yüksekliklerde daha fazla iken yükseklik arttıkça azalmaktadır. Örnek olarak 0,86 m için yaklaşık 100 saniye deşarj süresi varken 20 cm düşü yüksekliği (yaklaşık %25 düşü yüksekliği artışı) deşarj süresini neredeyse iki katına çıkarmıştır. Ancak 1,26 m için deşarj süresi yaklaşık 270 saniye iken 1,46 m için yaklaşık 350 saniye olarak görülmektedir, bu grafikten anlaşılacağı üzere güç doğrudan yüksekliğin bir fonksiyonu iken deşarj süresi ise Eş. (10)'dan da görüleceği üzere yüksekliğin karekökü (logaritmik) ile artmaktadır. Aynı zamanda belirli bir yükseklik için deşarj süresi tank yüzey alanının boru kesit alanına oranı (A_1/A_2) ile doğru orantılı şekilde artmaktadır.

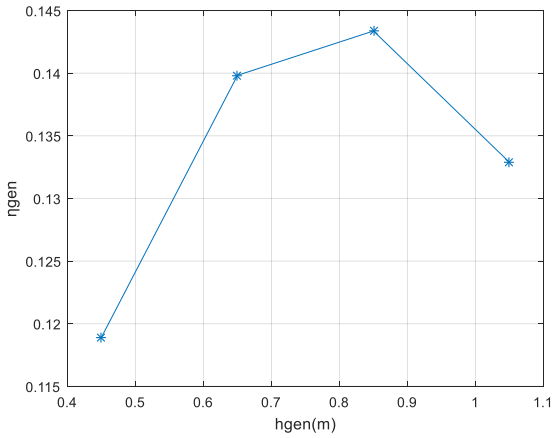
Şekil 13 incelendiğinde belirli bir yükseklikte tanktaki suyun boşalma süresi aralığında elektriksel güç (P_{elk}) değişimleri diğer türbin ve jeneratör kayıp parametrelerinden bağımsız değerlendirildiğinde karakteristik yapı bakımından türbine giren mekanik giriş gücü ile bir benzerlik gösterdiği söylenebilir. Şöyle ki; zamanla su seviyesi azaldıkça türbin girişindeki suyun çizgisel hızı logaritmik olarak azalır ($v \approx (2gh)^{0.5}$). Bu yüzden tanktaki suyun bitme süresine yakın seviyelerde güçteki azalma biraz daha yavaşlarken başlangıç yüksekliklerinde güçteki azalma daha hızlı gerçekleşmektedir. Rezervuar kapasitesinin sınırlı olması ve su seviyesinin değişken olması sebebi ile bu sonuç değişken yükseklikli PVPHS uygulamaları için önem arz etmektedir.



Şekil 13. Farklı düşü yüksekliklerindeki jeneratör elektriksel gücünün zamanla değişimi

Diğer yandan Eş. (12) kullanılarak farklı düşü yüksekliklerine göre sistemin verim değişimi Şekil 14'te verilmiştir. Jeneratör yük direnci sabit tutulduğu için su pompa sistemindeki verim değişimlerine benzer şekilde öngörülen elektriksel yüklemeye için verimin en iyi olduğu

kritik bir h_{gen} düşü yüksekliği oluşmuştur. Bu düşü yüksekliği ile hidroelektrik sistemin kullanımı enerji bakımından diğerlerine göre daha yüksek verimli çalışma imkanı vermektedir. Çünkü deneyde tankın çıkış kesiti, boru yüksekliği, su türbin, jeneratör ve yüklenme koşulları sabit tutulmuştur. Bu jeneratör yüküne göre verimin en iyi olduğu kritik yükseklik oluşmaktadır. Sabit bir yükte daha fazla yüksekte akan su daha fazla momentum ve elektriksel akım oluşturacaktır. Fakat bu durumda hızın bir fonksiyonu olan sistem iç sürtünme kayıpları ve su türbininin en iyi verimi sağladığı devir yakalanamayabilir. Benzer şekilde düşü yüksekliği çok düşerse de türbinin maksimum mekanik gücün alındığı devirden daha düşük noktaya gelebilir. Her iki durumda sistem verimsiz olmaktadır. Bu durum tipik olarak Şekil 14'te görülmektedir.



Şekil 14. Farklı düşü yüksekliklerine göre hidroelektrik sisteminin verimi

5. Sonuçlar

Belirli bir yükseklik için hidroelektrik çevrimde kullanılacak su depolama performansının en iyi olduğu kritik bir ışınım ve bu ışınım karşılık gelen kritik bir basma yüksekliği vardır. Bu kritik noktaların belirlenmesi, pompa sisteminin seçiminde önemli rol oynamaktadır ve yapılacak seçim ile sistemin genel verimi oldukça belirgin şekilde iyileştirilebilir. Pompaya ait motorun en verimli çalıştığı nokta ile PV'nin değişen ışınımlardaki maksimum güç noktaları çakıştırılması durumunda pompanın verimi kadar PV'nin de en verimli şekilde kullanılması sağlanacak ve bu sayede sistemin genel verimi daha da iyileştirilecektir. Maksimum güç noktasında çalışan entegre bir PV-motor sistemi belirli bir basma yüksekliğindeki hazneye daha fazla debi ile su depolama imkanı verir. Böylece bir pratik yaklaşım olarak, ele alınan bir bölgenin ortalama ışınım enerjisine (günlük, sezonluk, yıllık vb.) karşılık gelen seçilen PV sisteminin maksimum güç noktasında çalışacak şekilde bir PV- motor sistem ayarlaması yapıp, bu giriş gücü koşullarında çalışacak

pompanın ilgili çıkış Q-h karakteristiğindeki Eş. (7)'deki P_{hid} maksimum yapan kritik H_p değeri hazneye basma yüksekliği olarak seçilirse, hidroelektrik sistem için en iyi verimde suya potansiyel enerji kazandırılabilir. AC motorlar da inverter yardımıyla sisteme bağlanarak pompada kullanılabilir ve bu sayede basma (enerji depolama) verimi daha da artırılabilir. Sistemin PV-pompaj kısmı için mümkün olduğu kadar geniş bir ışınım aralığında pompa motorunun PV'nin ışınım ile değişen maksimum güç noktalarında veya yakınında çalıştırılmasının performans için en önemli kriter olduğu görülmüştür.

Benzer şekilde hidroelektrik çevrim için akım-gerilim ve elektriksel güç karakterizasyonu farklı düşü yüksekliklerinde bu set üzerinde yapılmıştır. Seçilen su türbini ve jeneratör için türbine maksimum mekanik güç aktarılacak bir devirde jeneratör yüklendiğinde en iyi verimi elde edilmektedir. Enerji üretilmeye başlayınca haznedeki kalan su miktarı doğal olarak azalacaktır. Böylece bilinen diğer hidroelektrik çevrim sistemlerinden farklı olarak haznedeki seviye değişmesi performansı değiştirdiğinden, belirli bir kullanım süresi için jeneratöre uygun bir elektrik yük seçimi ya da ilgili yüke göre su türbin girişlerinde debi ayarlaması yapılmasının gerekli olduğu görülmüştür. Sabit yükseklikli PVPHS sisteminin coğrafi kısıtlar sebebi ile kurulamaması durumunda bu çalışmada incelenen hususlar ve elde edilen veriler ışığındaki tekliflerin uygulanması durumunda değişken yükseklikli PVPHS uygulamalarının da mümkün olabileceği ve bu konuda daha fazla araştırma imkanı doğabileceği görülmektedir.

Kaynaklar

- [1] Twidell J. and Weir T., 2015. *Renewable Energy Resources*, 3rd ed. London and New York: Routledge Taylor & Francis Group.
- [2] Farret F. A. and Simões M. G., 2006. *Integration of Alternative Sources of Energy*. John Wiley & Sons, Inc.
- [3] Dunn B., Kamath H., and Tarascon J. M., 2011. Electrical energy storage for the grid: A battery of choices. *Science (80-.)*, 334(6058), pp. 928–935.
- [4] Rehman S., Al-Hadhrani L. M., and Alam M. M., 2015. Pumped hydro energy storage system: A technological review. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 44, pp. 586–598.
- [5] McLean E. and Kearney D., 2014. An evaluation of seawater pumped hydro storage for regulating the export of renewable energy to the national grid. *Energy Procedia*, 46, pp. 152–160.

- [6] Ekoh S., Unsal I., and Maheri A., 2016. Optimal sizing of wind-PV-pumped hydro energy storage systems. *4th Int. Symp. Environ. Friendly Energies Appl. EFEA 2016*, pp. 1–6.
- [7] Chaudhary P., and Rizwan M., 2018. Energy management supporting high penetration of solar photovoltaic generation for smart grid using solar forecasts and pumped hydro storage system. *Renew. Energy*, 118, pp. 928–946.
- [8] Lingamuthu R. R. and Mariappan R., 2019. Power flow control of grid connected hybrid renewable energy system using hybrid controller with pumped storage. *Int. J. Hydrogen Energy*, 44(7), pp. 3790–3802.
- [9] Ma T., Yang H., Lu L., and Peng J., 2014. Technical feasibility study on a standalone hybrid solar-wind system with pumped hydro storage for a remote island in Hong Kong. *Renew. Energy*, 69, pp. 7–15.
- [10] Papaefthymiou S. V. and Papathanassiou S. A., 2014. Optimum sizing of wind-pumped-storage hybrid power stations in island systems. *Renew. Energy*, 64, pp. 187–196.
- [11] Atlam O., 2009. An experimental and modelling study of a photovoltaic/proton-exchange membrane electrolyser system. *Int. J. Hydrogen Energy*, 34(16), pp. 6589–6595.