

Kayaboğazi Hidroelektrik Santralının Elektrik Enerji Üretim Kapasitesinin İncelenmesi

An Investigation for Electric Energy Generation Capacity of Kayaboğazi Hydroelectric Power Plant

Halil Kurt¹, Yılmaz Aslan¹

¹Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fak., Elektrik Elektronik Müh. Bölümü, 4300, Kütahya
mutefli@gmail.com, yilmaz.aslan@dpu.edu.tr

Özet

Bu çalışmada Kütahya İli Tavşanlı İlçesinde bulunan ve genellikle sulama amaçlı kullanılan Kayaboğazi Barajı'ndan elektrik enerjisi üretimi araştırılmıştır. Bu amaçla kurulması düşünülen küçük ölçekli hidroelektrik santral (KÖHES) türbinlerinin işletilmesi bulanık mantık (BM) ve programlanabilir mantık denetleyici (PLC) kullanılarak yapılacaktır. Bu amaçla Devlet Su İşleri (DSİ) tarafından elde edilen geçmiş yıllara ait su verileri dikkate alınarak, su rejiminin mevsimsel olarak farklılık göstermesinden dolayı, farklı güçlerde üç adet Francis türbininin kurulması planlanmıştır. Sistemde türbinlere verilecek olan su miktarı ve türbinlerin kontrolü ise PLC ile yapılacaktır. Bu uygulama ile Kayaboğazi Barajı'nın insansız ve uzaktan uygun bir şekilde işletilmesi ile tarımsal sulamanın yanı sıra güvenilir bir yenilenebilir enerji kaynağı olarak ülke ekonomisine de katkısı sağlanacaktır.

Anahtar kelimeler: Bulanık mantık, PLC, küçük hidroelektrik santraller.

Abstract

In this study electric power generation from the Kayaboğazi dam which is located in the town of Tavşanlı, Kütahya and mainly used for irrigation and flood control purposes is investigated. For this purpose the control and operation of the projected small-scale hydro-electric power station will be achieved by using fuzzy logic (FL) control and programmable logic controller (PLC). Hence by evaluating the water flow data recorded by the Turkish Water Works (DSI), and considering the seasonal variations in water flow to the dam, installment of three Francis turbines with different power outputs has been planned. The amount of water flow to the turbines and their operation will be controlled by the PLCs. With this implementation, apart from irrigating the agricultural fields of the local area; the Kayaboğazi Dam will serve as a reliable and renewable source and contribute to the economy of the country as a whole.

Key words: Fuzzy logic, PLC, small hydroelectric power plants.

1. Giriş

Gelişen ve kaynakları, teknolojiyle beraber hızla tükenen dünyamızda enerji ihtiyacı had safhadadır. Çok çeşitli enerji elde yöntemleri olmakla birlikte yenilenebilir enerji kaynakları son yıllarda oldukça rağbet görmektedir. Bunlar, rüzgâr santralleri, güneş panelleri, jeotermal kaynaklar, hidroelektrik santraller (HES) olarak sıralanabilir. HES'ler dünyadaki elektrik ihtiyacının yaklaşık olarak %19'unu karşılamaktadır. HES'ler içinde KÖHES'ler önemli bir yere sahiptir ve uluslararası kesin bir tanımlama olmamakla beraber genellikle 2,5 MW ile 25 MW arasında değişmektedir. Kabul edilen üst sınır ise 10 MW'tır. 2,5 MW'ın altındaki güçler mini-hidro, 500 kW'ın altındaki güçler mikro-hidro ve 10 kW'ın altındaki güçler ise piko-hidro olarak sınıflandırılmaktadır [1-3].

Günümüzde BM algoritmaları çalışmaları oldukça fazla olup, mühendislik alanları, sosyal konular, ekonomi, sağlık hatta eğitim alanlarında birçok çalışma bulunmaktadır [4-16]. Bunun da temel sebebi, bulanık algoritmada sayısal verilerin sözel olarak ifade edilebilmesi ya da sözel ifadelerin yerine sayısal verilerin kullanılıp gerekli hesaplamaların ve sistem eğitiminin rahatlıkla yapılabilmesi olarak değerlendirilebilir. Özellikle mühendislik alanları ile ilgili yapılan çalışmalarda yüksek verimlilik hedefi diğer bir ifadeyle optimizasyon, BM algoritmaları çalışmaları amacını oluşturmaktadır. BM algoritmaları otomasyon çalışmaları temel sistem bileşeni olarak genellikle PLC cihazları kullanılır. PLC, endüstriyel otomasyon ve enerji sistemlerindeki sıra denetimi, hareket denetimi, süreç denetimi ve veri yönetimi uygulamalarındaki yaygın kullanımı, ayrıca kullanım kolaylığı, taşınabilirliği, montajı, haberleşmeye uygunluğu, az arızalanması ve ucuzluğu gibi nedenlerden dolayı BM algoritmaları denetleyici olarak tercih edilmektedir. Bu tür kontrol gerçekleştirilirken PLC'nin içinde gömülü olan bulanık işlemci diğer bir ifadeyle BM bloktan faydalanılır ve bu şekilde bulanık algoritma temelli gerekli kontrol algoritması oluşturulur. BM blokları PLC'nin olmadığı durumlarda da PLC programı BM algoritmaya uygun bir şekilde yazılmak suretiyle yine BM temelli bir denetim gerçekleştirilebilir [11,17].

Literatürde BM ile yapılan çeşitli optimizasyon çalışmaları, PLC ve merkezi denetim ve veri toplama sistemi (SCADA, Supervisory Control And Data Acquisition) ile çeşitli

endüstriyel otomasyon çalışmaları mevcuttur. Ancak PLC'nin BM kontrolör olarak kullanıldığı çalışmalar oldukça azdır. Bu çalışmalar, BM algoritmaları çalışmaları, PLC ve SCADA ile yapılan otomasyon çalışmaları ve BM algoritmaları PLC ile kontrol çalışmaları şeklinde sınıflandırılabilir.

Bu çalışmada, Kayaboğazı Barajı'nın enerji potansiyeli değerlendirilmiş ve türbinlerin optimizasyonu BM blokları PLC ile sağlanmıştır. Bu amaçla barajdaki mevcut su potansiyelinden maksimum güç elde etmek için uygun beş üyelik kümeli ve yedi üyelik kümeli BM algoritması oluşturulmuş ve karşılaştırmaları yapılmıştır. BM algoritması ile türbinlere verilen su miktarı kontrol edilerek türbin hız kontrolü sağlanıp devrede kalacak türbin sayısına ve gücüne karar verilmiştir. BM denetleyicisi kullanmanın avantajı mevsimsel şartlara göre su ve şebeke yük miktarının sık değiştiği durumlarda daha fazla dikkat çekmektedir. Modellemede farklı güçlerdeki türbinlerin farklı kombinasyonlarda kullanımları ile arz ve talep dengesine göre en verimli enerji üretimi sağlanmıştır [4-5]. Kayaboğazı barajının verimli bir şekilde işletilmesi Türkiye ekonomisine ve enerji pazarına katkıda bulunacağı gibi, Kütahya ilinde yeni enerji imkânları meydana getirecek, bunun yanı sıra Türkiye'nin yenilenebilir enerji kapasitesine de katkıda bulunacaktır.

2. Kayaboğazı Barajı

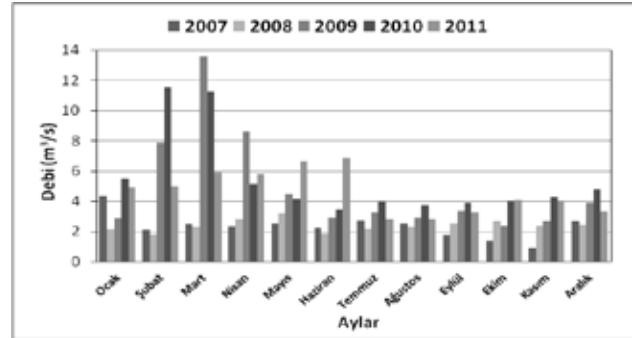
Kayaboğazı barajı 1988 yılında işletmeye açılmış olup halen tarımsal sulama ve içme suyu amaçlı işletilmekte olup, ayrıca Seyitömer Termik Santralının soğutma suyu ihtiyacını da karşılamaktadır. Kayaboğazı barajı yapılan planlama çalışmaları neticesinde talvegden 38 m, temelden ise 45 m yüksekliğinde toprak ve kaya dolgu tipinde inşa edilmiştir. Baraj kret kotu 924.75 m olup kret uzunluğu 237 m'dir. Baraj rezervuarında minimum su seviyesi 908.4 m, normal su seviyesi 917.8 m, maksimum su seviyesi ise 922.9 m'dir. Tablo 1'de Kayaboğazı barajına 2007-2011 yılları arası gelen su miktarı, ortalama debi değerleri ile bu değerlere göre sistemin çıkış gücü ve elde edilecek toplam elektrik enerjisi verilmektedir.

Tablo 1: Kayaboğazı barajı debi ve enerji üretim değerleri.

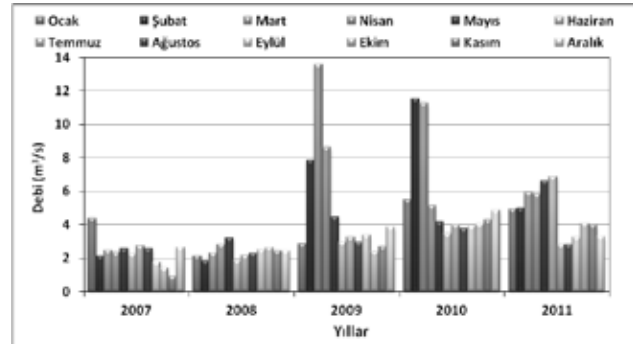
Aylar	Ortalama Gelen Su Miktarı (m ³)	Ortalama Debi (m ³ /s)	Hidro Sistem Çıkış Gücü (kW)	Aylık Toplam Potansiyel Elektrik Enerjisi (kWh)	Yıllık Toplam Potansiyel Elektrik Enerjisi (kWh)
Ocak	10274020	3,96	642	462331	5524736
Şubat	14690988	6,07	984	661094	
Mart	18435600	7,11	1152	829602	
Nisan	12825680	4,95	802	577156	
Mayıs	10874720	4,20	680	489362	
Haziran	8988420	3,47	562	404479	
Temmuz	7759840	2,99	485	349193	
Ağustos	7449520	2,87	466	335228	
Eylül	7667640	2,96	479	345044	
Ekim	7529520	2,90	471	338828	
Kasım	7412500	2,86	463	333563	
Aralık	8863460	3,42	554	398856	

Kayaboğazı barajı dolusavağı karşıdan alıslı ve kapaklı tipte olup sol sahilde yer almaktadır. Dolusavak kret kotu 912 m,

kret boyu ise 29.60 m'dir. Dolusavak 1988 m³/s olası en büyük taşkın debisine göre tasarlanmış olup, maksimum deşarjı 1800 m³/s'dir. Dipsavak yapısı barajın sağ sahilinde yer almaktadır. Toplam boyu 373.15 m olan dipsavağın sonunda vana odası yer almakta olup, bu vana odasının bulunduğu bölümde yer alan iki adet branşman vasıtası ile Tavşanlı ilçesi içme suyu ihtiyaçları ve Enne barajına verilecek sular dere yatağına bırakılmadan baraj rezervuarının basıncı yardımı ile alınmaktadır. Kalan su ise vana odası sonunda yer alan enerji kırıcı havuzda enerjisi alınarak dere yatağına bırakılmaktadır. Kayaboğazı barajı, 886.75 m talveg kotunda inşa edilmiş olup drenaj alanı 1024 km²'dir [1-3].



Şekil 1: Aylık bazda debi (m³/s)



Şekil 2: Yıllık bazda debi (m³/s)

3. Türbin Seçimi ve Modellemesi

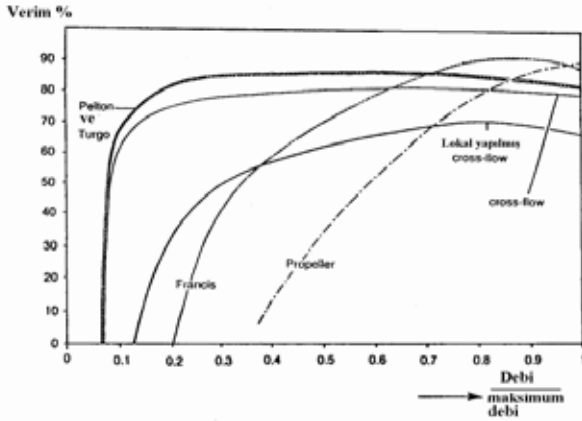
Hidro-elektrik türbinlerde elde edilen güç net hidrolik düşü ile türbinden akan suyun çarpımıyla doğru orantılıdır. Herhangi bir hidro sistemin çıkış gücünün genel formülü denklem (1)'de verilmiştir.

$$P = \eta \rho g Q H \quad (1)$$

Denklemden; P türbinden elde edilen mekanik gücü (W), η türbinin hidrolik verimini, ρ suyun özgül ağırlığını (kg/m^3), g yerçekimi ivmesini (m/s^2), Q suyun debisini (m^3/s) ve H etkin düşü yüksekliğini (m) göstermektedir. Türbin verimi, etkin düşü yüksekliği ile suyun debisine bağlı olup iyi tasarlanmış türbinlerde %80 ile %90 arasında değişmektedir [1-3]. Kayaboğazı barajındaki etkin düşü yüksekliği 18 metredir. Bu değere göre seçilmesi gereken türbin ya da türbinlerin tipleri Francis (salyangozlu) türbin ya

da Crossflow türbin olup etkin düşü yüksekliğine göre uygun tepki türbini tipi ise sadece Francis (salyangozlu) türbindir [1-3]. Şekil 1 ve Şekil 2'de sırasıyla Kayaboğazi barajını besleyen Kocaçay Irmağı'na ait aylık ve yıllık bazda su debileri verilmiştir. Şekillerden su debilerinin düzenli olmadığı, aylık ve yıllık bazda oldukça fazla değiştiği görülmektedir.

Tablo 1'de verilen aylık ortalama su debi değerleri, 2.86 m³/s ile 7.11 m³/s arasında değişmektedir. Şekil 3'de hidroelektrik santrallerde kullanılan çeşitli türbinlerin verim eğrileri görülmektedir. Şekilde de görüleceği gibi türbinlerin verimleri su debilerine göre değişmekte, düşük debilerde ise oldukça fazla azalmaktadır. Bu durumda Kayaboğazi barajında bir adet büyük güçlü Francis türbin seçildiğinde düşük su debilerinde de türbinin veriminin çok fazla düşmesinden dolayı elektrik enerjisi üretimi mümkün olmayacaktır. Bu durumda bir adet 1150 kW gücünde türbin kullanmak yerine 250 kW (T1), 400 kW (T2) ve 750 kW (T3) güçlerinde üç adet türbin seçilmiştir. Böylece barajdaki su potansiyeline göre uygun sayıda ve güçte türbin devreye alınacak ve türbinlerin her koşulda yüksek verimle çalışması sağlanacaktır [1-2]. BM hesaplamalarında sistemin girdileri olan potansiyel ve talep güçleri, hidro-sistem çıkış güçlerine göre değerlendirilmiştir. Sistemin çıktısı olan berraklaştırma kısmındaki kural tabanı oluşturulurken bu durum dikkate alınmıştır.



Şekil 3: Türbin verim eğrileri [2]

4. Bulanıklaştırma

Uygulanan BM denetleyicinin temel amacı, türbinleri sürekli olarak hidrolik verimliliklerini su debisine ve talep gücüne göre uygun değerde tutacak şekilde çeşitli kombinasyonlarda çalıştırmaktır. Bu çalışmada beş üyelik kümeli ve yedi üyelik kümeli olmak üzere iki BM algoritması kullanılmıştır. BM denetleyici kullanmanın avantajları; genel kontrol algoritması kullanılabilmesi, hızlı tepki vermesi olarak sıralanabilir [4]. Kayaboğazi barajında kullanılması düşünülen türbinlerin devreye alınması ve devreden çıkarılması için BM yöntemiyle yapılan hesaplamalarda sistemin girdileri olarak suyun potansiyel gücü (PG) ve talep edilen güç (TG) alınmıştır. Sistemin çıktısı olarak da, bu değerlerine göre sistemden elde edilecek uygun çıkış gücüdür (G). Potansiyel güç ve talep edilen güç değerleri için kullanılacak bulanık algoritma fonksiyonlarındaki üyelik fonksiyonları üçgen ve yamuk üyelik fonksiyonları şeklinde olup aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır [5].

Yamuk üyelik fonksiyonu;

$$Yamuk(X;a,b,c,d) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}, 0\right)\right) \quad (2)$$

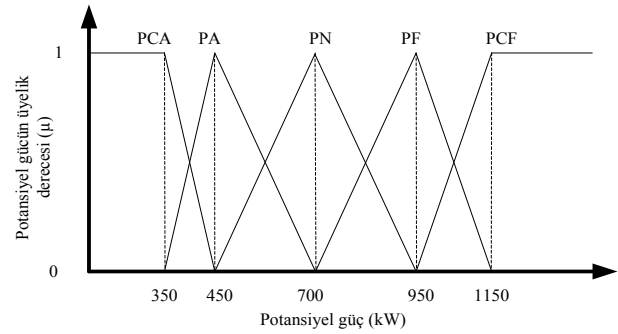
Üçgen üyelik fonksiyonu;

$$Üçgen(X;a,b,c) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right)\right) \quad (3)$$

4.1. Çalışmanın Beş Üyelik Kümeli BM Algoritması

• Suyun Potansiyel Gücü

Şekil 4'te barajın potansiyel gücünün üyelik kümeleri PCA, PA, PN, PF ve PCF görülmektedir. Burada üç adet üçgen ve iki adet yamuk şekil fonksiyonundan olmak üzere toplam beş üyelik kümesinden oluşan şekiller kullanılmıştır. Potansiyel güç Tablo 1'deki verilerden anlaşılacağı üzere 0 ile 1150 kW arasında değişmektedir. Üyelik fonksiyonlarının karşılıkları da potansiyel çok az (PCA), potansiyel az (PA), potansiyel normal (PN), potansiyel fazla (PF) ve potansiyel çok fazla (PCF) şeklinde sınıflandırılmıştır. Üyelik fonksiyonlarının hesaplanması ve değer aralıkları Tablo 2'de gösterilmiştir.



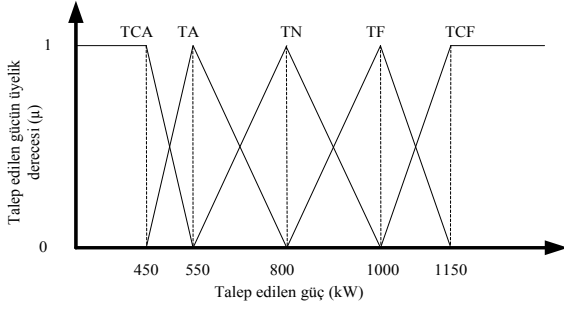
Şekil 4: Beş üyelik kümeli potansiyel güç üyelik derecesi

Tablo 2: Beş üyelik kümeli potansiyel güç üyelik kümeleri

Üyelik Kümeleri	Fonksiyon	Değer Aralığı
PCA	$\mu(x)=1$ $\mu(x)=(450-x)/(450-350)$	$x \leq 350$ $350 \leq x \leq 450$
PA	$\mu(x)=(x-350)/(450-350)$ $\mu(x)=(700-x)/(700-450)$	$350 \leq x \leq 450$ $450 \leq x \leq 700$
PN	$\mu(x)=(x-450)/(700-450)$ $\mu(x)=(950-x)/(950-700)$	$450 \leq x \leq 700$ $700 \leq x \leq 950$
PF	$\mu(x)=(x-700)/(950-700)$ $\mu(x)=(1150-x)/(1150-950)$	$700 \leq x \leq 950$ $950 \leq x \leq 1150$
PCF	$\mu(x)=(x-950)/(1150-950)$ $\mu(x)=1$	$950 \leq x \leq 1150$ $x \geq 1150$

• Talep Edilen Güç

Barajdan talep edilen gücün üyelik kümeleri TCA, TA, TN, TF ve TCF Şekil 5'te gösterilmektedir. Burada da üç adet üçgen ve iki adet yamuk şekil fonksiyonundan olmak üzere toplam beş üyelik kümesinden oluşan şekiller kullanılmıştır. Talep edilen güç ile potansiyel güç arasında paralellik olması için talep edilen güç 0 ile 1150 kW arasında alınmıştır. Üyelik fonksiyonlarının karşılıkları da potansiyel güçte olduğu gibi talep çok az (TCA), talep az (TA), talep normal (TN), talep fazla (TF) ve talep çok fazla (TCF) şeklinde sınıflandırılmıştır.



Şekil 5: Beş üyelik kümeli talep edilen güç üyelik derecesi

Fonksiyonlar için kabul edilen değer aralıkları Tablo 3'te gösterilmiştir. Örneğin; *TA* üyelik derecesi 0.69 ve *TN* üyelik derecesi 0.30 ise talep edilen güç yaklaşık 640 kW olmaktadır.

Tablo 3: Beş üyelik kümeli talep edilen güç üyelik kümeleri

Üyelik Kümeleri	Fonksiyon	Değer Aralığı
<i>TCA</i>	$\mu(x)=1$ $\mu(x)=(550-x)/(550-450)$	$x \leq 450$ $450 \leq x \leq 550$
<i>TA</i>	$\mu(x)=(x-450)/(550-450)$ $\mu(x)=(800-x)/(800-550)$	$450 \leq x \leq 550$ $550 \leq x \leq 800$
<i>TN</i>	$\mu(x)=(x-550)/(800-550)$ $\mu(x)=(1000-x)/(1000-800)$	$550 \leq x \leq 800$ $800 \leq x \leq 1000$
<i>TF</i>	$\mu(x)=(x-800)/(1000-800)$ $\mu(x)=(1150-x)/(1150-1000)$	$900 \leq x \leq 1000$ $1000 \leq x \leq 1150$
<i>TCF</i>	$\mu(x)=(x-1000)/(1150-1000)$ $\mu(x)=1$	$1000 \leq x \leq 1150$ $x \geq 1150$

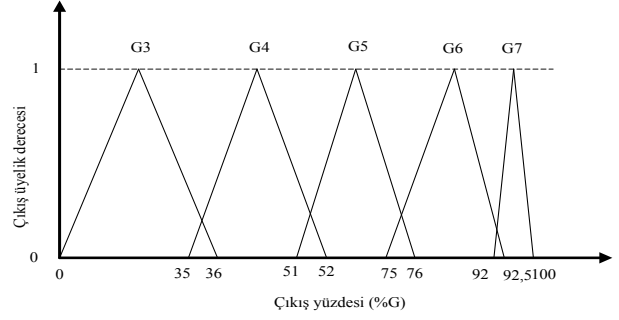
• Kural Tabanı (Berraklaştırma)

Beş üyelik kümeli BM denetleyici kural tabanı Tablo 4'te verilmiştir. BM, *PG* ve *TG* girişlerine karşılık gelecek bulanık çıkış sonuçlarından oluşan kurallardır. Kural tabanındaki iki giriş bilgisine karşılık gelen çıkış üyelik kümeleri *G3*, *G4*, *G5*, *G6* ve *G7* olarak belirlenmiştir. Burada *G3*, *T1* ve *T2* türbinlerini; *G4*, *T3* türbinini; *G5*, *T1* ve *T3* türbinlerini; *G6*, *T2* ve *T3* türbinlerini ve *G7*, *T1*, *T2* ve *T3* türbinlerini ifade etmektedir. MATLAB'da yapılan çıkış gücü hesaplamasında ağırlık merkezi yöntemi (*COG*) uygulanmıştır [5].

$$COG = \frac{\sum_{x=a}^b \mu_A(x) \cdot x}{\sum_{x=a}^b \mu_A(x)} \quad (4)$$

Tablo 4: Beş üyelik kümeli kural tabanı

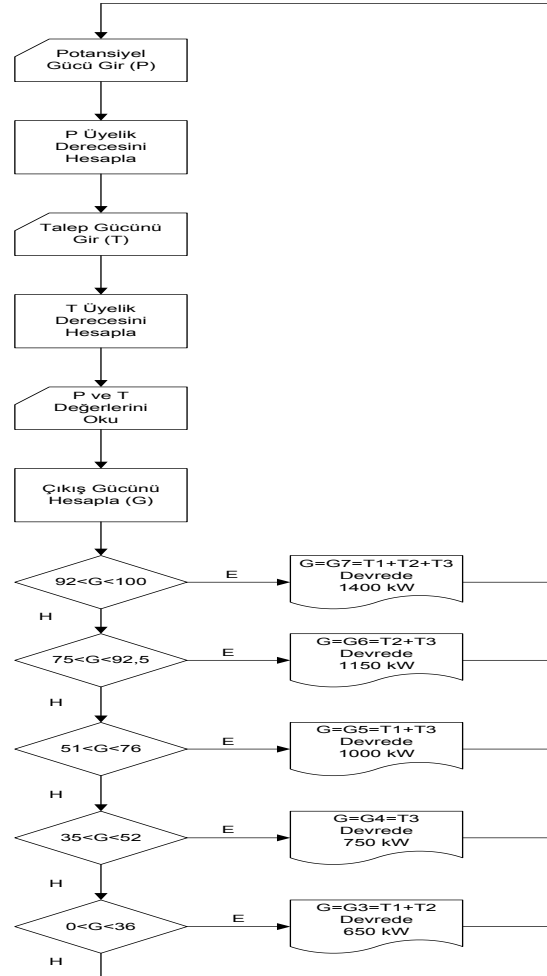
Üyelikler	<i>TCA</i>	<i>TA</i>	<i>TN</i>	<i>TF</i>	<i>TCF</i>
<i>PCA</i>	<i>G3</i>	<i>G3</i>	<i>G3</i>	<i>G3</i>	<i>G3</i>
<i>PA</i>	<i>G3</i>	<i>G4</i>	<i>G4</i>	<i>G4</i>	<i>G4</i>
<i>PN</i>	<i>G3</i>	<i>G5</i>	<i>G5</i>	<i>G5</i>	<i>G5</i>
<i>PF</i>	<i>G3</i>	<i>G5</i>	<i>G6</i>	<i>G6</i>	<i>G6</i>
<i>PCF</i>	<i>G3</i>	<i>G5</i>	<i>G6</i>	<i>G7</i>	<i>G7</i>



Şekil 6: Beş üyelik kümeli çıkış gücü üyelik derecesi

Şekil 6, Tablo 4'te verilen kural tabanına göre oluşturulmuştur. Buna göre *G3* çıkış gücü yüzdesi yaklaşık %36, *G4* çıkış gücü yüzdesi yaklaşık %16, *G5* çıkış gücü yüzdesi yaklaşık %24, *G6* çıkış gücü yüzdesi yaklaşık %16 ve *G7* çıkış gücü yüzdesi yaklaşık %8'dir [5].

Şekil 7'de beş üyelik kümeli BM algoritması görülmektedir. Algoritmada sürekli bir döngü söz konusudur ve *P* ile *T* değerlerinin üyelik derecelerine göre sistemin çıkış gücü hesaplanmaktadır. Bu sistemde öncelikle maksimum çıkış gücünden yola çıkılarak kademe kademe diğer çıkış güçlerine bakılır ve tekrar en başa dönlür.



Şekil 7: Beş üyelik kümeli bulanık mantık algoritması [5]

Çıkış gücü %92'den büyük ya da %100'e eşit ise maksimum güç olan $T1$, $T2$ ve $T3$ türbinleri devrededir. %75'den büyük ya da %92,5 eşit ise $T2$ ile $T3$ türbinleri devrededir. %51'den büyük ya da %76'ya eşit ise $T1$ ile $T3$ türbinleri devrededir. %35'ten büyük ya da %52'ye eşit ise sadece $T3$ türbini devrededir. %0'dan büyük ya da %36'ya eşit ise $T1$ ile $T2$ türbinleri devrededir. Matlab-Simulink ortamında yapılan benzetimlerde Tablo 5'deki çıkış değerleri bulunmuştur. Bu algoritmada sürekli olarak geri bildirim ve kontrol çevrimi vardır. Böylece sistem kendi kendine karar vererek hangi türbini devreye alacağını ya da hangisini devreden çıkaracağını belirlemektedir [5].

Tablo 5: Beş üyelik kümeli BM algoritması ile elde edilen örnek çıkış güçleri

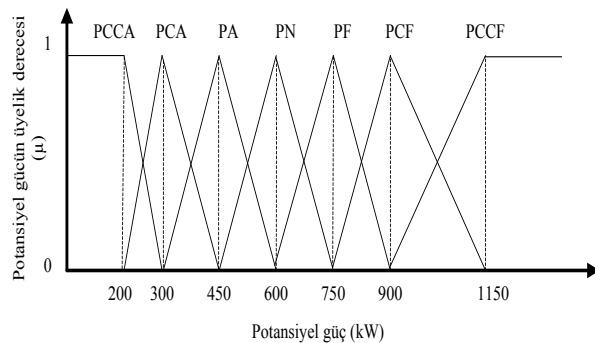
Potansiyel Güç (P)	Talep Edilen Güç (T)	Elde Edilen Çıkış Gücü (G)	Devreye Girecek Türbin(ler)
400 kW	300 kW	G3 (%20)	T1-T2
800 kW	900 kW	G5 (%73,3)	T1-T3
1000 kW	1150 kW	G6 (%87,5)	T2-T3

4.2. Çalışmanın Yedi Üyelik Kümeli BM Algoritması

Yedi üyelik kümeli bulanık algoritmada da giriş üyelik kümeleri için üçgen ve yamuk fonksiyon, çıkış birimi ve berraklaştırma için ağırlık merkezi yöntemi kullanılmıştır.

• Suyun Potansiyel Gücü

Beş tane üçgen ve iki tane yamuk şekil fonksiyonundan oluşan toplam yedi üyelik kümesi Şekil 8'de gösterilmiştir. Üyelik fonksiyonlarının karşılıkları da çok çok az ($PCCA$), çok az (PCA), az (PA), normal (PN), fazla (PF), çok fazla (PCF) ve çok çok fazla ($PCCF$) şeklinde sınıflandırılmıştır. Üyelik fonksiyonlarının hesaplanması ve değer aralıkları Tablo 6'da gösterilmiştir.



Şekil 8: Yedi üyelik kümeli potansiyel güç üyelik derecesi

• Talep Edilen Güç

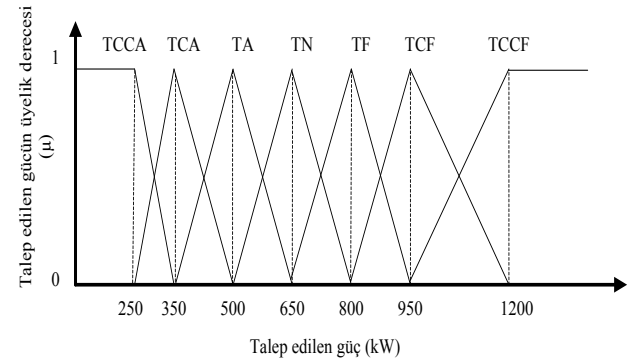
Barajdan talep edilen gücün üyelik kümeleri $TCCA$, TCA , TA , TN , TF , TCF ve $TCCF$ olup, burada da beş tane üçgen ve iki tane yamuk şekil fonksiyonundan oluşan toplam yedi üyelik kümesi Şekil 9'da gösterilmiştir. Talep edilen güç de

potansiyel güç ile paralellik olması için beş üyelik kümeli hesaplamadan farklı olarak 0-1200 kW arası alınmıştır.

Tablo 6: Yedi üyelik kümeli potansiyel güç üyelik kümesi

Üyelik Kümeleri	Fonksiyon	Değer Aralığı
$PCCA$	$\mu(x)=1$	$x \leq 200$
	$\mu(x)=(300-x)/(300-200)$	$200 \leq x \leq 300$
PCA	$\mu(x)=(x-200)/(300-200)$	$200 \leq x \leq 300$
	$\mu(x)=(450-x)/(450-300)$	$300 \leq x \leq 450$
PA	$\mu(x)=(x-300)/(450-300)$	$300 \leq x \leq 450$
	$\mu(x)=(600-x)/(600-450)$	$450 \leq x \leq 600$
PN	$\mu(x)=(x-450)/(600-450)$	$450 \leq x \leq 600$
	$\mu(x)=(750-x)/(750-600)$	$600 \leq x \leq 750$
PF	$\mu(x)=(x-600)/(750-600)$	$600 \leq x \leq 750$
	$\mu(x)=(900-x)/(900-750)$	$750 \leq x \leq 900$
PCF	$\mu(x)=(x-750)/(900-750)$	$750 \leq x \leq 900$
	$\mu(x)=(1150-x)/(1150-900)$	$900 \leq x \leq 1150$
$PCCF$	$\mu(x)=(x-900)/(1150-900)$	$900 \leq x \leq 1150$
	$\mu(x)=1$	$x \geq 1150$

Üyelik fonksiyonlarının karşılıkları da potansiyel güçte olduğu gibi çok çok az, çok az, az, normal, fazla, çok fazla ve çok çok fazla şeklinde sınıflandırılmıştır. Fonksiyonlar için kabul edilen değer aralıkları Tablo 7'de gösterilmiştir.



Şekil 9: Yedi üyelik kümeli talep edilen güç üyelik derecesi

Tablo 7: Yedi üyelik kümeli talep edilen güç üyelik kümeleri

Üyelik Kümeleri	Fonksiyon	Değer Aralığı
$TCCA$	$\mu(x)=1$	$x \leq 250$
	$\mu(x)=(350-x)/(350-250)$	$250 \leq x \leq 350$
TCA	$\mu(x)=(x-250)/(350-250)$	$250 \leq x \leq 350$
	$\mu(x)=(500-x)/(500-350)$	$350 \leq x \leq 500$
TA	$\mu(x)=(x-350)/(500-350)$	$350 \leq x \leq 500$
	$\mu(x)=(650-x)/(650-500)$	$500 \leq x \leq 650$
TN	$\mu(x)=(x-500)/(650-500)$	$500 \leq x \leq 650$
	$\mu(x)=(800-x)/(800-650)$	$650 \leq x \leq 800$
TF	$\mu(x)=(x-650)/(800-650)$	$650 \leq x \leq 800$
	$\mu(x)=(950-x)/(950-800)$	$800 \leq x \leq 950$
TCF	$\mu(x)=(x-800)/(950-800)$	$800 \leq x \leq 950$
	$\mu(x)=(1200-x)/(1200-950)$	$950 \leq x \leq 1200$
$TCCF$	$\mu(x)=(x-950)/(1200-950)$	$950 \leq x \leq 1200$
	$\mu(x)=1$	$x \geq 1200$

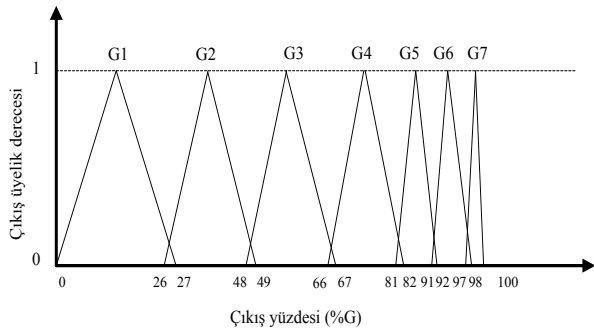
• Kural Tabanı (Berraklaştırma)

Yedi üyelik kümeli BM denetleyici kural tabanı Tablo 8'de verilmiştir. Kural tabanındaki iki giriş bilgisine karşılık gelen çıkış üyelik kümeleri *G1, G2, G3, G4, G5, G6* ve *G7* olarak belirlenmiştir. Bulanık algoritmadaki değerler kullanıcının veya programcının tecrübesi ve öngörüsüne göre tespit edilir. Beş üyelik kümeli bulanık algoritma hesaplamasına göre, yedi üyelik kümeli hesaplama daha hassas bir çıkış vermiştir.

Şekil 10'da yedi üyelik kümeli BM algoritması için *G1* çıkış gücü yüzdesi %27, *G2* çıkış gücü yüzdesi %22, *G3* çıkış gücü yüzdesi %12, *G4* çıkış gücü yüzdesi %15, *G5* çıkış gücü yüzdesi %10, *G6* çıkış gücü yüzdesi %6 ve *G7* çıkış gücü yüzdesi %2'dir.

Tablo 8: Yedi üyelik kümeli kural tabanı

Üyelikler	<i>TCCA</i>	<i>TCA</i>	<i>TA</i>	<i>TN</i>	<i>TF</i>	<i>TCF</i>	<i>TCCF</i>
<i>PCCA</i>	G1	G1	G1	G1	G1	G1	G1
<i>PCA</i>	G1	G2	G2	G2	G2	G2	G2
<i>PA</i>	G1	G2	G3	G3	G3	G3	G3
<i>PN</i>	G1	G2	G3	G4	G4	G4	G4
<i>PF</i>	G1	G2	G3	G4	G5	G5	G5
<i>PCF</i>	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G6
<i>PCCF</i>	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7



Şekil 10: Yedi üyelik kümeli çıkış gücü yüzdesi üyelik derecesi

Yedi üyelik kümeli BM algoritmasında çıkış gücü %97'den büyük ya da %100'den küçük ise maksimum güç olan T1, T2 ve T3 türbinleri devrededir. Çıkış gücü %91'den büyük ya da %98'den küçük ise T2 ile T3 türbinleri devrededir.

Tablo 9: Yedi üyelik kümeli BM algoritması ile elde edilen örnek çıkış güçleri

Potansiyel Güç (P)	Talep Edilen Güç (T)	Elde Edilen Çıkış Gücü (G)	Devreye Girecek Türbin(ler)
225 kW	450 kW	G1 (%21,2)	T1
600 kW	500 kW	G2 (%55)	T1-T2
1000 kW	1500 kW	G6 (%95,8)	T2-T3
1100 kW	1200 kW	G6 (%97,6)	T2-T3
1125 kW	1200 kW	G7 (%98,05)	T1-T2-T3

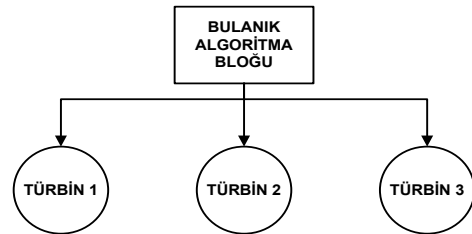
Çıkış gücü %81'den büyük ya da %92'den küçük ise T1 ile T3 türbinleri devrededir. Çıkış gücü %66'dan büyük ya da %82'den küçük ise sadece T3 türbini devrededir. %48'den büyük ya da %67'den küçük ise T1 ile T2 devrededir. %26'dan büyük ya da %49'dan küçük ise T2 devrededir. %0'dan büyük ya da %27'den küçük ise sadece T1 türbini devrededir. Matlab-Simulink ortamında yapılan benzetimlerde Tablo 9'daki çıkış değerleri bulunmuştur.

5. Bulanık Denetleyici Seçimi

PLC, endüstriyel otomasyon ve enerji sistemlerindeki; sıra denetimi, hareket denetimi, süreç denetimi ve veri yönetimi uygulamalarında yaygın kullanımı, ayrıca kullanım kolaylığı, taşınabilirliği, montajı, haberleşmeye uygunluğu ve ucuzluğu gibi nedenlerden dolayı BM denetleyici olarak tercih edilmiştir [18]. Bu kontrolü gerçekleştirirken PLC'nin içinde gömülü olan bulanık işlemci kullanılmıştır. Özellikle analog input ve analog outputlar kullanılarak su debisi ve yük akımları sürekli olarak sensörler ve akım trafoları ile 4-20 mA'lık akım sinyaline dönüştürülmüştür. Bu sinyallere göre PLC ve operatör paneli programlanmış, PLC içerisindeki BM denetleyici modülü ile kontrol algoritması oluşturulmuştur. Su miktarı ve yük değerlerine göre BM algoritmalı PLC'de hangi türbin ya da türbinlerin devreye alınıp alınmayacağına karar verilmektedir [17].

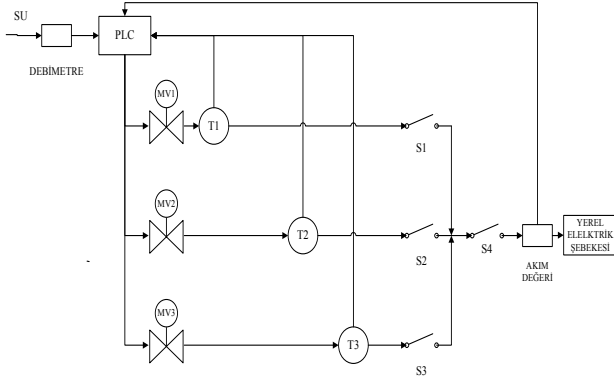
5.1. PLC Programı

Şekil 11'de genel yapısı verilen sistemin PLC programı blok şeması ve PLC programı akış diyagramı sırasıyla Şekil 12 ve Şekil 13'te gösterilmektedir. Motorlu vanaların kontrolü tamamen akım trafosundan alınan akım değeri ile debimetreden alınan su debi bilgisine göre BM algoritmalı PLC tarafından sağlanmaktadır.



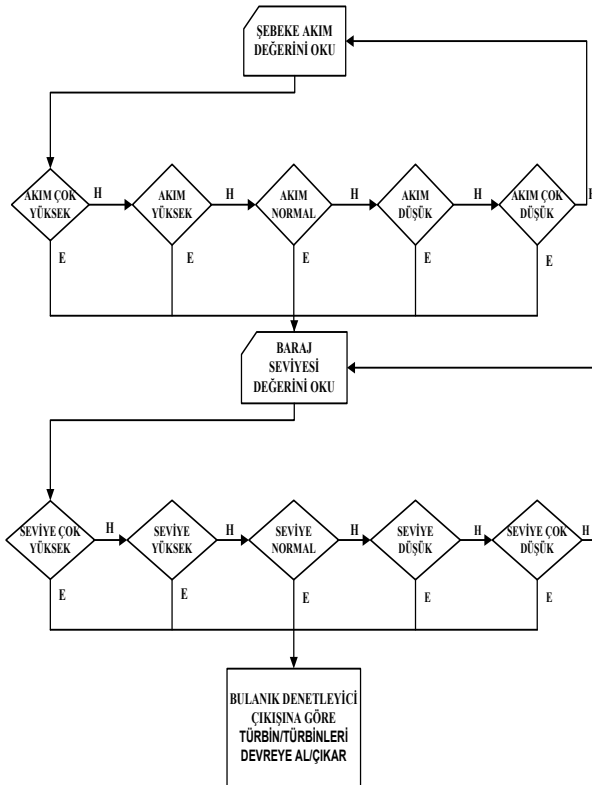
Şekil 11: Bulanık kontrollü modellenmiş sistemin genel yapısı

Şekil 12'de MV1, MV2 ve MV3 türbinleri devreye alan motorlu vanaları, T1, T2 ve T3 türbinleri, S1, S2 ve S3 alternatörleri paralel bağlayacak şalterleri ve S4'de santrali yerel orta gerilim (OG) şebekesine bağlayan kesiciyi göstermektedir. Yerel OG şebekesine bağlantı yapacak şalter kapatılmadan önce türbinlerin önündeki vanalar açılarak ilgili alternatör üretime hazır hale getirilir. Başlangıç aşamasında sistem baraj doluluk seviyesine göre maksimum üretilebilecek potansiyel elektrik gücü belirlenir ve buna göre devreye gereken kapasite ve sayıda türbini alarak çalışmaya başlar. Sistem tarafından türbinlerin devreye alınmasının ardından şebeke şalterleri kapalı konuma getirilir. Şebeke bağlantı barasındaki akım trafolarından alınan akım bilgisi, PLC aracılığı ile işlenerek belirli bir süre boyunca yük ihtiyacı izlenir. Sisteme bağlı yüklerin kararlı hale gelme süresi belirlenir. Belirlenen süre sonunda sistemde kararsızlık var ise PLC süreyi tekrar başlatır.



Şekil 12: PLC programı blok şeması

Bu işlemlerden sonra Şekil 13'te akış diyagramı verilen sonsuz döngüdeki bulanık mantık algoritması devreye girer. Şekil 12'de görüldüğü gibi PLC programının bulanık kontrol kısmı, yük akımının izlenmesi, baraj seviyesinin izlenmesi ve PLC kontrollü motorlu vana blokları arasında gerçekleşmektedir. Şekil 12'deki PLC programı blok şemasında görüldüğü gibi alınan akım değerleri ile su debisine göre türbinlerin kontrolü başlar. Alınan akım değerleri PLC karar bloğunda işlenir ve kaç türbinin kalacağı belirlenir. Devreden çıkacak türbin var ise ilgili şalter açılarak sistemde ihtiyaç oranında türbin devrede bırakılır. Bu döngü bulanık mantık algoritmasında da görüldüğü gibi sürekli olarak tekrar etmektedir [17,18].



Şekil 13: PLC programı akış diyagramı

6. Ekonomik Analiz

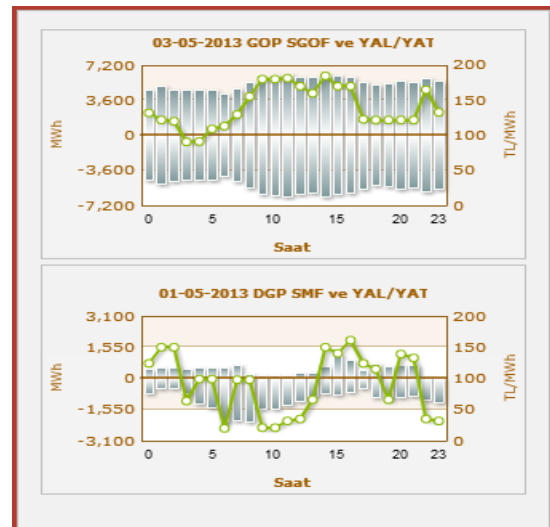
Bu çalışmada bir adet 1150 kW'lık Francis türbin ile 250 kW, 400 kW ve 750 kW'lık üç adet Francis türbin kombinasyonları kullanılarak üretilen elektrik enerjisi miktarı hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 10'da verilmiştir.

1150 kW'lık bir adet türbin kullanıldığında üretilen elektrik enerjisi miktarı hesaplanmıştır. Türbinin verimi de hesaba katılarak yapılan hesaplama sonucunda yaklaşık olarak yıllık 4,45 GWh'lık bir hidroelektrik üretimin gerçekleştirilebileceği hesaplanmıştır. Şubat ve Mart aylarında hidro sistem çıkış gücüne yakın değerler elde edilmiş, diğer aylarda hidro sistem çıkış gücünün oldukça altında üretim gerçekleştirilmiştir. Türbin verimi %57'ye kadar düşmüş, en yüksek Şubat ayında %87 verimle üretim gerçekleştirilmiştir. Yıllık ortalama üretim verimi %68 olarak bulunur.

250 kW, 400 kW ve 750 kW'lık üç adet türbin beş üyelik kümeli BM algoritma denetimli şekilde kullanıldığında türbinin verimi de hesaba katılarak yapılan hesaplama sonucunda yaklaşık olarak yıllık 5 GWh'lık bir üretimin gerçekleştirilebileceği öngörülmüştür. Yıllık ortalama üretim verimi %80 olarak bulunmuştur.

250 kW, 400 kW ve 750 kW'lık üç adet türbin yedi üyelik kümeli BM algoritma denetimli şekilde kullanıldığında ise türbinlerin verimi de hesaba katılarak yapılan hesaplama sonucunda yaklaşık olarak yıllık 5,3 GWh'lık bir üretimin gerçekleştirilebileceği görülmüştür. Yıllık ortalama üretim verimi de %85 olarak bulunmuştur.

Bir adet türbin kullanıldığında yıllık verim ortalaması %68, beş üyelik kümeli BM algoritma denetimli üç adet türbin kullanıldığında yıllık verim ortalaması %80, yedi üyelik kümeli BM algoritma denetimli üç adet türbin kullanıldığında yıllık verim ortalaması %85 olarak gerçekleşmiştir. Bu durum üretimi de etkilemiş ve üretim artmıştır. Üretimler de yaklaşık olarak sırasıyla 4,45 GWh, 5 GWh ve 5,3 GWh olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 14: GOP, SGOF değerleri [19]

Kayaboğazı HES’de kurulması planlanan türbin sisteminde 1150 kW’lık bir adet türbinin maliyeti yaklaşık olarak 561.600 TL’dir. Üç adet türbinin (250 kW, 400 kW, 750 kW) fiyatı ise 1.190.800 TL’dir. Yedi üyelik kümeli BM algoritmali denetim sonucu üretilen elektrik enerjisi 5,3 GWh ve 1 adet 1150 kW’lık türbin sonucu üretilen elektrik enerjisi ise 4,45 GWh’tir. İki üretim miktarı arasındaki farkın 850 MWh olduğu görülmektedir. Şekil 14’te görüldüğü gibi gün öncesi piyasa (GOP) ve sistem gün öncesi fiyatı (SGOF) değerlerine göre elektrik enerjisinin MWh birim fiyatı yirmi dört saatlik ortalama değeri 140,36 TL’dir. 850 MWh’lık elektrik enerjisinin toplam fiyatı da 119.306 TL’dir. Bu değerlere göre 629.200 TL’lik türbin sistemi kurulum farkının yaklaşık 5 ile 5,5 yılda karşılanacağı öngörülmektedir.

Tablo 10: Benzetimleri yapılan sistemlerin maliyet karşılaştırması

Kullanılan Türbin Sistemi	Kurulum Maliyeti (TL)	Yıllık Üretim Miktarı (GWh)	Yıllık Gelir (TRY) (0,15*kWh)
1150 kW’lık bir adet türbin	561.600	4,5	675.000
BM denetimli üç adet türbin	1.190.600	5,3	795.000
Sistem Farkı	629.200	0,85	127.500

7. Sonuç

Bu çalışmada Kayaboğazı barajının mevcut su potansiyelinden maksimum güç elde etmek için beş ve yedi üyelik kümeli BM tabanlı kontrol algoritması geliştirilmiştir. PLC ile bulanık kontrolü yapılan Kayaboğazı Barajı HES’de türbinlerin maksimum verimde kullanılmaları sağlanarak maksimum çıkış gücü elde edilmeye çalışılmıştır. BM kontrolü türbinlere su geçişini sağlayan motorlu vanalar tarafında yürütülerek türbin hız kontrolü ve türbinlerin devreye alınıp çıkarılmasında BM algoritmali PLC’den faydalanılmıştır. Böylece Kayaboğazı barajının KÖHES’lere örnek olarak üretilebilir enerji potansiyeli değerlendirilmiştir. Modellemede farklı güçlerdeki türbinlerin farklı kombinasyonlarda kullanımları ile arz ve talep dengesine göre en verimli enerji üretimi gerçekleştirilmiştir. Sürekli olarak yük akımı miktarı ve su debisi değerleri alınarak kapalı bir döngü üzerindeki BM kontrolü PLC ile gerçekleştirilmiştir. Yedi üyelik kümeli BM algoritmali kontrolün oldukça verimli olduğu görülmüştür. Yapılan hesaplamalar sonucunda yapılacak fazladan yatırımın kendisini 5-5,5 yılda karşılayacağı öngörülmektedir. Kayaboğazı barajının BM temelli olarak en verimli bir şekilde işletilmesi Türkiye ekonomisine ve enerji pazarına katkıda bulunacağı gibi, Kütahya ilinde yeni enerji imkânları da meydana getirecek, bunun yanı sıra Türkiye’nin ürettiği “yeşil enerji” miktarına da katkıda bulunacaktır.

Teşekkür

Bu çalışma Dumlupınar Üniversitesi Bilimsel Araştırma Komisyonu tarafından desteklenmektedir. Proje No: 2012-39.

8. Kaynaklar

[1] Aslan Y., Yaşar C., Karabörk M.Ç., “Bir Mikro-Hidro Örneği: Kayaboğazı Barajı” *ELECO 2004, Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, 20-25, Bursa, 2004.

- [2] Aslan Y., Arslan O., Yasar C. “A sensitivity analysis for the design of small-scale hydropower plant: Kayabogazi case study”, *Renewable Energy*, 33(4), pp.791-801, 2008.
- [3] Paish O., ‘Small Hydro Power Technology and Current Status’, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Vol.6, pp 537-556, 2002.
- [4] Adzic E., Ivanovic Z., Adzic M., Katic V., “Maximum Power Search in Wind Turbine Based on Fuzzy Logic Control” *Acta Polytechnica Hungarica*, Vol.6(1), 2009.
- [5] Güler I., Tunca A. ve Gülbandır E., “Detection of Traumatic Brain Injuries Using FL Algorithm”, *Expert Systems with Applic.*, Vol.34,pp.1312-1317, 2008.
- [6] Lah M. T., Zupancic B., Peterelj J., Krainer A., “Daylight Illuminance Control with Fuzzy Logic”, *Solar Energy*, Vol.80, pp.307–321, 2006.
- [7] Da Ruan and van der Wal, A., 1998, “Controlling the Power Output of a Nuclear Reactor with Fuzzy Logic”, *Information Sciences*, Vol.110, pp.151-177, 1998.
- [8] Özdemir M. T., Orhan, A., “An Experimental System for Electrical and Mechanical Education: Micro Hydro Power Plant Prototype”, *Procedia*, Vol.47, pp.2114 – 2119, 2012.
- [9] Franco I.C., Dall’Agnol M., Costa, T.V., Fileti A.M .F., Silva F.V., “A Neuro-Fuzzy Identification of Non-Linear Transient Systems: Application To A Pilot Refrigeration Plant”, *International Journal of Refrigeration*, Vol.34, pp.2063-2075, 2011.
- [10] Zhang H., Davigny A., Colas F., Poste Y., Robyns B., “Fuzzy Logic Based Energy Management Strategy For Commercial Buildings Integrating Photovoltaic And Storage Systems”, *Energy and Buildings*, Vol.54, pp.196–206, 2012.
- [11] Saad N. and Arrofiq M., , “A PLC-Based Modified-Fuzzy Controller For PWM Driven Induction Motor Drive with Constant V/Hz Ratio Control”, *Robotics and Computer-Integrated Manufac.*, Vol.28, pp.95–112, 2012.
- [12] Aydoğmuş Z., “Implementation of a Fuzzy-Based Level Control Using SCADA”, *Expert Systems with Applications*, Vol.36, pp.6593–6597, 2009.
- [13] Omid M., Lashgari M., Mobli H., Alimardani R., Mohtasebi S., Hesamifard, R., “Design of FL Control System Incorporating Human Expert Knowledge for Combine Harvester”, *Expert Systems with Applications*, Vol.37, pp.7080–7085, 2010.
- [14] Yılmaz S., Çakır B., Gedik A., Dinçer H., “Speed Control of a Conveyor System By Means of Fuzzy Control Aided PLC”, *ISIE’99*, Slovenia, pp.1328-1332, 1999.
- [15] Zidani Z., Said R.N., “Direct Torque Control of Induction Motor with Fuzzy Minimization Torque Ripple”, *Electrical Engineering*, Vol. 56, pp.183–188, 2005.
- [16] Bayındır R., Çetinçeviz Y., “A Water Pumping Control System with a PLC and Industrial Wireless Modules for Industrial Plants—An Experimental Setup”, *ISA Transactions*, Vol. 50, pp.321–328, 2011.
- [17] Özçalık H.R., Türk A., Yıldız C., Koca Z., “Katı Yakıtlı Buhar Kazanında Yakma Fanının BM Denetleyici ile Kontrolü”, *KSÜ Fen ve Mühendislik Dergisi*, 11(1), 2008.
- [18] Aslan Y., Türe Ş., “Location of faults in power distribution laterals using superimposed components and programmable logic controllers”, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol.33(4), pp.1003-1011, 2011.
- [19] <http://dgpys.teias.gov.tr/dgpys/>



Halil Kurt

Halil Kurt 22 Nisan 1975 tarihinde Kütahya’da doğdu. 1998’de Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik-Elektronik Eğitimi Bölümü’nde lisans eğitimini tamamladı. 2011 yılında Dumlupınar Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü’nde başladığı yüksek lisans eğitimini 2013 yılında tamamladı. Halen Seyitömer Çok Programlı Lisesinde Elektrik Öğretmeni olarak çalışmaktadır. Bulanık mantık, yapay sinir ağları, programlanabilir mantık denetleyiciler ve yenilenebilir enerji ilgi alanları arasına girmektedir.



Doç. Dr. Yılmaz Aslan

Yılmaz Aslan 1986 yılında Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik-Elektronik Eğitimi Bölümü’nde lisans eğitimini, 1997 yılında ise University of Bath (İngiltere), Elektrik-Elektronik Mühendisliğinde yüksek lisans ve doktora eğitimini bitirerek Dumlupınar Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü’nde göreve başlamış ve halen aynı üniversitede görevine devam etmektedir. Başlıca çalışma konuları enerji iletim ve dağıtım hatlarında arıza yeri tahmini, yenilenebilir enerji kaynakları ve programlanabilen mantık denetleyiciler olarak sıralanabilir.