

Atıksu Arıtma Tesislerine MikroHES

İÇİNDEKİLER TABLOSU

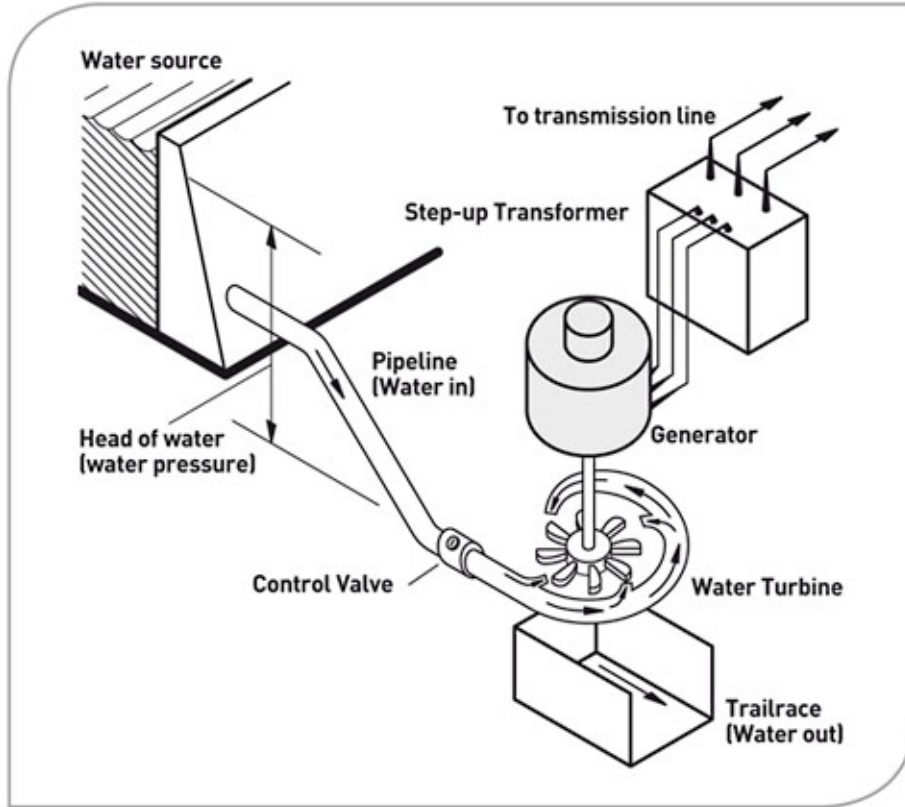
1. GİRİŞ	3
2. MikroHES'LER	6
3. MikroHES BİLEŞENLERİ VE SEÇİMİ	11
3.1. Türbin seçimi	11
3.2 Jeneratör seçimi	14
3.3 Cebri Boru Seçimi	15
4. MikroHES'le ENERJİ ÜRETİM HESAPLAMASI	16
5. YATIRIM MALİYETİ	18
6. AMORTİSMAN SÜRESİ	19
7. KAYNAKLAR	21
Şekil 1. AAT'sinde MikroHES Uygulaması	3
Şekil 2. AAT'de MikroHES Uygulaması.....	6
Şekil 3. MikroHES Uygulama Örnekleri	9
Şekil 4. Yıl İçinde Atıksu Debisinin Değişimi	10
Şekil 5. Düşü Yüksekliği Dikkate Alındığı AAT'de Türbin Kurulum Şeması: Brüt Kafa (H_{max}), Net Düşü Yüksekliği (H_n), Hidrolik Sürtünme Kayıpları (h_f) ve Yerel Kayıplar (h_{loc}).....	12
Şekil 6. Türbin Tipleri, Uygulama Aralığı ve Verimlilikleri	13
Şekil 7. PAT Sistemi Örnek Uygulama Şematik Diyagramı	14
Şekil 8. (a) Atıksu Deşarj Alanı ve (b) Alan Seviyeleme Sonuçları.....	17
Şekil 9. AAT'de Düşü Yüksekliği	17
Tablo 1. AAT'de Düşü Yüksekliği ve Atıksu Debisine Göre Üretilen Elektrik Enerjisi	7
Tablo 2. Akış Hızı (Debi) ile Düşü Yüksekliğine Bağlı Olarak MikroHES'in Uygulanabilirliği.....	7
Tablo 3. Düşük Düşü Yüksekliği ve Debi Oranına Bağlı Olarak Türbin Tipleri	10
Tablo 4. Cebri Boru Malzemelerinin Bileşenleri.....	15
Tablo 5. Türbin Yatırım Maliyeti Tahminleri	18
Tablo 6. MikroHES'lerin Sınıflandırılması.....	19
Tablo 7. MikroHES İstasyonları ve Kapasiteleri	19

1. GİRİŞ

Mikro hidro güç, düşen sudan üretilen enerjinin küçük ölçekli bir şekilde kullanılmasıdır. “Düşü Yüksekliği”, kot farkı olarak bilinen dikey su düşüşü hidroelektrik üretimi için önemlidir. Bu nedenle, hidroelektrik üretimi için iki temel kriter: atıksu akışı ve düşü yüksekliğidir. Bir mikro hidroelektrik santralının (MikroHES) kapasitesi genellikle 20 ila 100 kW arasında değişir.

Mikro hidroelektrik santralleri ise üretim kapasitesi 100 kW’dan daha küçük olan santraller için yapılan bir sınıflandırmadır.

Her atıksu arıtma tesisinde (AAT)’de, bir MikroHES tesisi kurulabilir.



Şekil 1. AAT’sinde MikroHES Uygulaması

AAT’de atıksular, arıtıldıktan sonra dezenfekte edilir ve alıcı ortama deşarj edilmeden önce kurulacak olan MikroHES tesisinde potansiyel enerjiden elektrik enerjisi üretilir.

AAT’lerinde MikroHES’ler, kurulması ve elektrik enerjisi üretilmesi çeşitli avantajlar sunar. AAT’lerinde kurulacak MikroHES’ler, genel olarak kirletmeyen, zarar vermeyen, çevre dostu olan, güvenilen ve istikrarlı elektrik enerjisi üretilen yenilebilir enerji kaynağıdır. Bunun için ne büyük bir inşaat işi, ne baraj ve ne de sular altında kalacak arazi gerektirir. En az çevre etkisi ile AAT’lerinde güç üretmek için MikroHES’ler kurulabilir.

AAT’lerinde MikroHES ile düşük oranda elektrik enerjisi üretilse dahi kurulması cazip olabilir.

Kot farkından dolayı yüksekten düşen suyun kullanımı uzun zamandan beri bir enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır; belki de insanoğlunun potansiyel enerjisiyi elektrik enerjisine dönüştürmesi elektrik üretimi için bilinen en eski yenilenebilir enerji tekniklerinden biridir. MikroHES’lerde, arıtılmış atıksular türbini çevirir, türbin jeneratörü döndürür ve elektrik enerjisi üretilir.

AAT bazlı MikroHES’lerle, oldukça istikrarlı, ucuz ve pratik enerji üretilebilir. AAT’lerinde arıtılmış suyu deşarj etme düşü yüksekliği/basıncı, debisi, yaz ve kış dönemlerinde yedekleme hizmeti kullanılarak sürekli olarak korunmaktadır. Birçok AAT’leri MikroHES uygulamasında mevcut farklı deşarj düşü yüksekliği başarılı bir şekilde değerlendirilmiştir.

Güvenilir çalışma için AAT’lerinde farklı deşarj kot farkı için türbin-jeneratör setleri tavsiye edilmiştir. Jeneratörler, güvenilir güç üretimi için geliştirilen MikroHES’lerinde kullanılmıştır.

AAT’lerinde arıtılmış atıksu debisi yaz/kış ve gündüz/gece döngüleri dikkate alınarak tespit edilir, farklı debide ve deşarj düşü yüksekliği için tipik güç çıkışı tahmin edilebilir.

Yüksek ve düşük akış hızları, AAT’lerinde yüksek ve düşük enerji kullanımına karşılık gelir ve bu nedenle türbin, en uygun talebi karşılamak için güç üretir.

Özetle, “Yerel tüketiciye yerel güç”, elektriğin maliyeti veya satış fiyatlarına bakılmaksızın ve nakliye ve voltaj düşürme/azaltma ihtiyacı olmaksızın AAT’lerinde gerekli olan enerjiye ihtiyaç duyulduğu anda güç tesiste üretilebilir. İtme (impulse) türbini kullanılırsa, AAT’i çıkışında, akış hızından dolayı çözülmüş oksijen konsantrasyonlarının artması nedeniyle su kalitesi üzerinde olumlu bir etki olabilir.

MikroHES’lerde elektrik enerjisi üretimi güvenilir olduğu ve en az bakım gerektirdiği için giderek daha popüler hale gelmektedir. Arıtılmış atıksuyun mevcut farklı deşarj düşü yüksekliği ve akış hızları için çıkış gücü tespit edilmeli. Buna göre farklı mevcut düşü yüksekliği için çeşitli türbin-jeneratör setleri de geliştirilen bir tesisin güvenilir çalışması için önerilir. Bu tür mikro santrallerin ana avantajı bağımsız bir MikroHES olması; arıtılmış atıksuyun kullanılabilirliği her zaman korunduğu için iklim şartlarına ve yağışlara bağlı değildir. Bu yöntemle elektrik üretiminde ilk yatırım maliyeti daha yüksektir, ancak bakım ve üretim maliyetinde en ucuzdur. MikroHES, gelecekteki büyüme ihtiyaçlarını karşılamak için verimliliği azaltarak maliyeti düşürmek için yenilenebilir enerji ve yerel üretim de dahil olmak üzere bir dizi yenilikçi çözüm sunabilir.

Bu çalışmada, hedeflenen güç çıkışı olarak 12 kW’a kadar üretmek isteyen küçük ölçekli hidro şemaları desteklemektedir. Tipik bir AAT’de net enerji talebinin yaklaşık %50 ila %65’i havalandırma ünitesinde tüketilmektedir. Bu nedenle, MikroHES sisteminin uygulanması başarılı bir şekilde sağlanırsa, sistem, özellikle havalandırma sisteminde enerji tüketiminin tesis operasyonunun elektrik üretim giderlerinin azaltılmasını kolaylaştırabileceğinden elektrik faturası için maliyet tasarrufu açısından önemli bir rakama katkıda bulunabilir.

Tüm türbinler çok çeşitli debi oranlarında kullanılabilir. Genellikle, türbinler yüksek verimliliğe sahiptir (verim %85-%90) ve deşarj debi (akış hızı) ne kadar yüksek olursa verim o kadar iyi olur. Türbin seçimi, su akış hızına ve düşü yüksekliğine bağlıdır.

2. MikroHES'LER

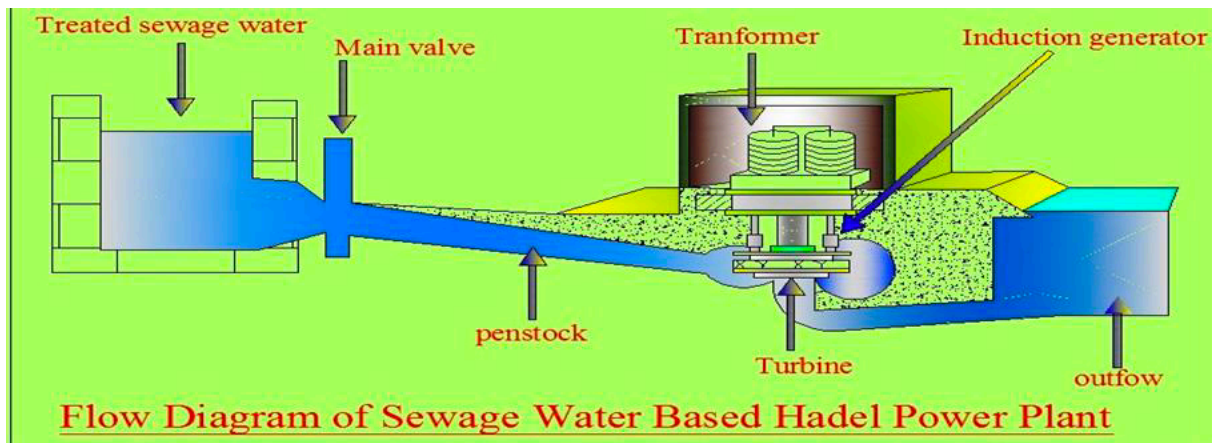
Ülkemizde yüzlerce atıksu arıtma tesisi bulunmaktadır. Birçok AAT'de MikroHES kurarak enerji üretimi için uygundur. AAT'lerinde düşü yüksekliği ve debiler uygunsa MikroHES sistemi kurularak yenilebilir elektrik enerjisi üretilebilir.

MikroHES yatırımı için temel 5 kriter var. Bunlar;

- Arıtılmış atıksuyun akış hızı,
- Hidrolik düşü yüksekliği (kot farkı),
- Türbin tipi,
- Yatırım maliyeti,
- Elektrik enerjisi bedeli,

en önemli 5 parametredir.

Arıtılmış atıksu, yüksek basınçta veya yüksek akış hızında akan, jeneratöre bağlı türbin veya su çarklarını döndürmek için kullanılır. Bu nedenle elektrik enerji üretimi için, arıtılmış atıksular, doğrudan alıcı ortama verilmesi yerine elektrik enerjisi üretilmesi için basınç altında bir cebri borudan türbine yönlendirilir. **Şekil 2**, arıtılmış atıksu bir giriş vanası vasıtasıyla cebri boru üzerinden türbine doğru bir su oluğundan geçer. Burada su, bıçağa çarpar ve jeneratöre bağlı mili döndürür. Böylece dönen mille elektrik enerjisi üretilir.



Şekil 2. AAT'de MikroHES Uygulaması

MikroHES yapım kararı verilmeden önce AAT'lerinde arıtılmış suyun düşü yüksekliği tespit edilmeli ve akış hızı (debi) ölçülmeli. MikroHES kapasitesinin belirlenmesi ve projelendirilmesi bu verilere göre yapılır. Düşü yüksekliğine ve arıtılmış atıksu akış hızına (debisine) bağlı olarak üretilen teorik elektrik enerjisi miktarı Tablo 1'de verilmiştir. Burada güvenilirlik değeri olarak enerji verimliliği faktörü 0,7 alınmıştır.

Tablo 1. AAT’de Düşü Yüksekliği ve Atıksu Debisine Göre Üretilen Elektrik Enerjisi

Düşü Yüksekliği, H	Akış Hızı ((Debi), L/sn							
	05	10	15	20	25	40	60	80
	Enerji Üretimi (W)							
2	69	137	206	275	343	549	824	1099
4	137	275	412	549	687	1099	1648	2197
6	206	412	618	824	1030	1648	2472	3296
8	275	549	824	1099	1373	2197	3296	4395
10	343	687	1030	1373	1717	2747	4120	5494
14	481	961	1442	1923	2403	3846	5768	7691
20	687	1373	2060	2747	3434	5494	8240	10987
30	1030	2060	3090	4120	5150	8240	12361	16481
40	1373	2747	2940	5494	6867	10987	16481	21974

Tablo 1. incelendiği zaman artırılmış atıksu düşü yüksekliği ve akış hızı (debi) arttıkça elektrik enerjisi üretim potansiyeli artmaktadır.

Diğer yandan, AAT’i düşü yüksekliğine ve artırılmış atıksu debisine bağlı olarak en geçerli, potansiyel olarak geçerli ve geçersiz enerji üretim uygulanabilirliği **Tablo 2’**de verilmiştir.

Tablo 2. Akış Hızı (Debi) ile Düşü Yüksekliğine Bağlı Olarak MikroHES’in Uygulanabilirliği

		Düşü Yüksekliği (m)								
		1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50	5.00
Akış Hızı (m ³ /sn)	0.03									
	0.04									
	0.05									
	0.10									
	0.20									
	0.30									
	0.40									
	0.50									
	0.60									
	0.70									
	0.80									
	0.90									
	1.00									
	2.00									
3.00										
4.00										

>15	11-15	9-10	8	7	6	5	4	3	2	1	<1
Geçersiz			Potansiyel Olarak Geçerli				En Geçerli				

Tablo 2 incelendiği zaman koyu yeşil ile gösterilen alanlarda enerji üretim potansiyeli oldukça yüksek ve uygun bölgelerdir.

Atıksu akış hızı yeterli ise 2 m gibi düşük düşü yüksekliği olan AAT'lerinde dahi elektrik enerjisi üretmek mümkündür. Düşü yüksekliği 3 m'den daha azsa "ultralow düşü yüksekliği" terimi kullanılır.

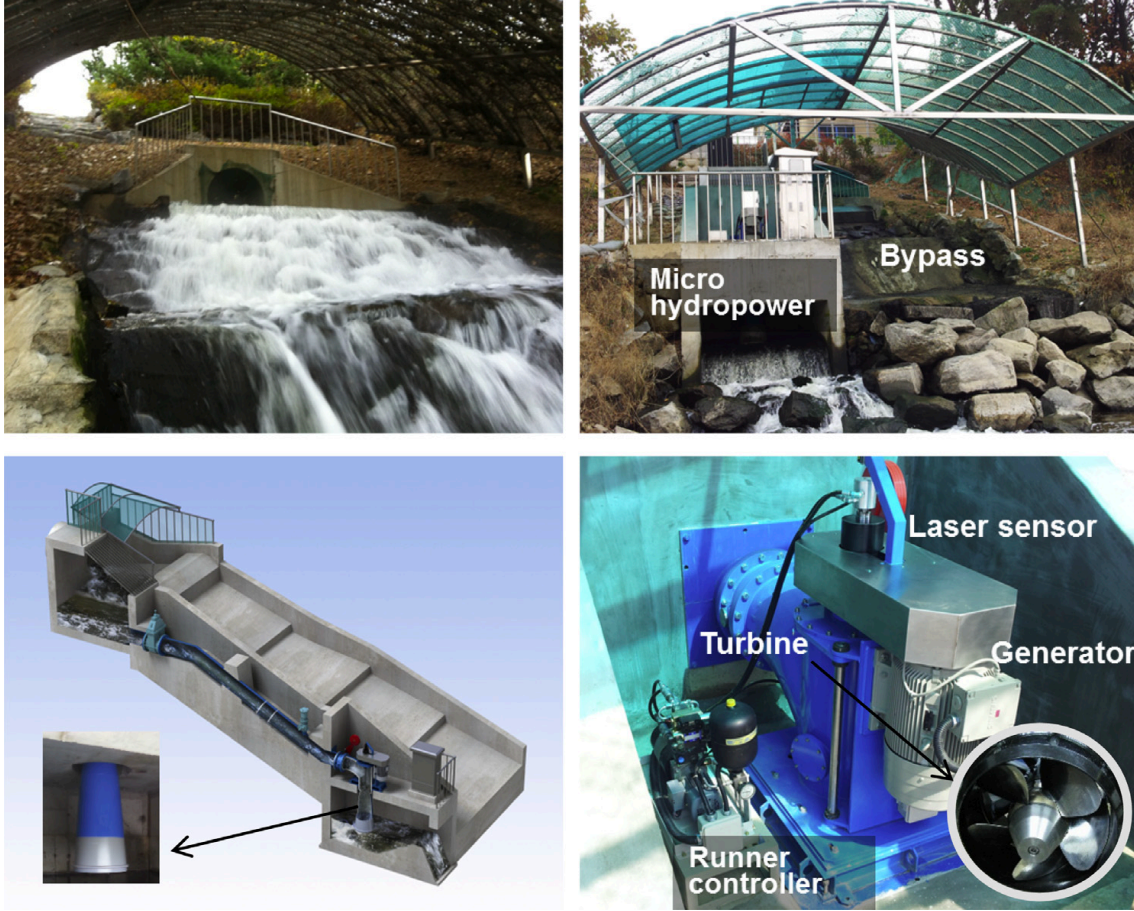
Düşük düşü yükseklikli bir hidro plan, yüksek akış hızını karşılamak için büyük bir geçiş/açıklık gerektirir, bu da düşük düşü yüksekliği türbinleri, kaçınılmaz olarak daha büyük boyutlu ve pahalı hale getirir ve sonuç olarak bir dizi mühendislik zorluğu oluşturur.

Buna ek olarak, düşük düş yüksekliği planları, düşü yüksekliği suyu ve kuyruk suyu seviyelerindeki değişiklik nedeniyle çok fazla akış dalgalanmasına neden olur. Bu varyasyon, 3 m'lik bir düşü yüksekliğinin 1 m'ye düşürülmesi, sistem güvenilirliğinin ve güç çıkışının azaltılması anlamına gelebilir. Düşük düşü yüksekliği bölgeleri, akış suyu hidroliği planlarında daha yaygın olma eğilimindedir, ancak AAT'i çıkışlarında da olabilir. İngiltere'nin düz güney doğu bölgesinde, hidro planların çoğu 3 m'den daha az düşü yüksekliğine sahiptir.

İngiltere'deki çoğu AAT'leri, atıksuyun yerçekimi akışından yararlanmak için düz bir arazi üzerine inşa edilmiştir. Bu nedenle düşük düşü yüksekliği diferansiyeli, yüksek düşü yüksekliği hidroelektrik uygulamasını teknik olarak imkânsız hale getirir.

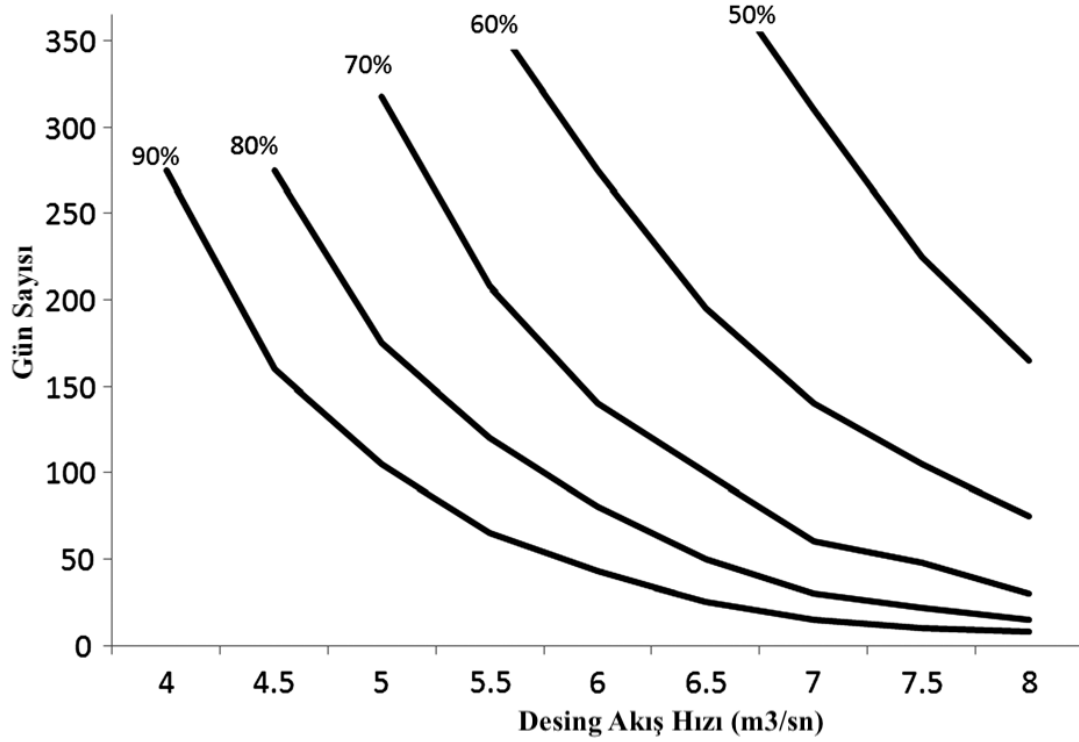
Seçenek olarak, deşarj edilen yere yerleştirilebilen, daldırılabilir veya arıtma çalışmalarından çıkış akışından önce yerleştirilebilen orta hızda çalışan kompakt bir ultra düşük düşü yükseklikli türbindir. Böyle bir türbin, mevcut sivil (civil) yapıları kullanabilmeli ve çevre dostu, uygun maliyetli, dayanıklı, yüksek yük faktörü montajı ve geleneksel bir türbin olarak verimli olmalıdır.

Su ve atıksu tesislerine sonradan takılabilen veya monte edilebilen düşük düşü yükseklikli türbinler için birkaç farklı seçenek vardır. Şu anda, araştırma çalışmaları, üretici literatürü ve vaka geçmişlerine dayanarak en az altı tip su türbini kullanılmaktadır. Bu türbinlerin bazıları birbirine benzer ve geleneksel türbinlerle aynı konseptle çalışır, ancak birçok ekonomik ve mühendislik faktörünü dikkate alacak şekilde değiştirilir. Bunlar: Arşimet vidalı türbinler, kuyu türbinleri, açık kanal türbinleri, su değirmenleri, tüp türbinleri ve sifonik türbinler. Her tip türbin, sınırlı bir düşü yüksekliği ve akış hızı aralığında çalışır.



Şekil 3. MikroHES Uygulama Örnekleri

Artılmış atık suyun debisinin saatlik, günlük, aylık ve mevsimlik değişimleri tespit edilerek MikroHES projelendirme çalışması yapılmalıdır. Çünkü gece ve gündüz saatlerinden, yağışlardan ve kuraklıktan dolayı artılmış atıksu debileri değişebilir. Buna göre debi ortaya çıkartılır. **Şekil 4'**de örnek bir çalışma verilmiştir.



Şekil 4. Yıl içinde Atıksu Debisinin Değişimi

Artılmış suyun debi (akış hızı) değişimi bilirse MikroHES için optimum projelendirme yapılabilir.

Hidroelektrik teknolojisi, düşük hidrolik gereksinimleri nedeniyle AAT'lerde MikroHES üretimi için uygundur (**Tablo 3**).

Tablo 3. Düşük Düşü Yüksekliği ve Debi Oranına Bağlı Olarak Türbin Tipleri

Parametreler	Debi Aralığı (m ³ /sn)	Düşü Yüksekliği (m)	Düşü Çıkış gücü (kW)
İmpulse Türbinler			
Pelton	0,008-0,01	3-100	1,6
Cross flow	0,01-1,0	5-60	100
Reaksiyon Türbinler			
Kaplan	1,5-60	1,5-60	20-3500
Vortex Francis	0,05-20	0,7-2	0,5-160
Pump as Turbin	0,03-6	3-80	310.000
Diğerleri			
Gravitational water votex flow power plant	0,7-3	1,5-2,5	5-50

3. MikroHES BİLEŞENLERİ VE SEÇİMİ

AAT'lerinde MikroHES'in ana bileşenleri;

- Türbin,
- Jeneratör,
- Cebri boru,

MikroHES tesisi ana bileşenlerinin seçimi için kriterler aşağıda detaylı olarak verilmiştir.

3.1. Türbin seçimi

AAT'lerinin kısa süreli, gece, gündüz, mevsimlik ve yıllık artılmış atıksu debisi değişimleri, MikroHES tesisi projelendirilmesinde türbin seçimini etkiler.

Türbin, doğrudan jeneratöre bağlanır veya jeneratör için gerekli olan hıza bağlı olarak dişliler veya kayışlar ve kasnaklar vasıtasıyla bağlanır. Türbin seçimi esas olarak düşü yüksekliğine (kot farkına) ve akış hızına göre belirlenir. Türbin seçimi, ayrıca jeneratörün çalışma hızına da bağlıdır. Su türbinleri, impulse (itme) türbinleri ve reaksiyon türbinleri olarak iki farklı gruba ayrılır. Hidro sistemlerde kullanılan türbinler itme (Pelton, Turbo ve Çapraz akış), reaksiyon (Francis, Pervane ve Kaplan) ve su çarkları olarak sınıflandırılabilir. AAT'leri artılmış atıksu deşarjları yüksek düşü yüksekliğine sahipse Pelton ve Turgo türbinler seçilir. Pervane ve Kaplan türbinleri, kanalizasyon enerji üretim sisteminde her yerde mevcut olan düşük düşü yüksekliği için önerilmektedir. Su dağıtım şebekelerinden enerjinin geri kazanılmasında, Pelton ve Francis türbinleri gibi iki tür türbin kullanılabilir. Bir arazi durumu için türbin seçimini, planın düşü yüksekliği ve akış hızı aralığı yönlendirilmesine rağmen, dönme hızı, kaçak hız ve kavitasyon sınırı gibi diğer faktörler de dikkate alınır.

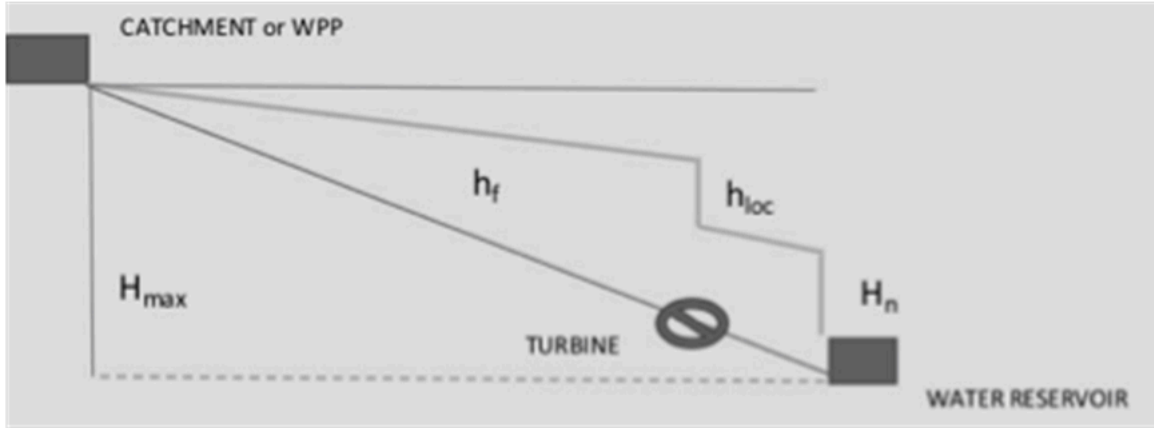
Genellikle, impulse türbinleri, yüksek düşü yüksekliği için daha sık kullanılırken, reaksiyon türbinleri, düşük düşü yüksekliği sahip AAT'lerinde kullanılır.

Esas olarak, Pelton, Turgo ve Crossflow (Michell-Banki olarak da bilinir)'u içeren türbinler, bir su jetinin akış hızının değiştirilmesi ile çalışır. Su, kendi basıncını kullanarak türbine girmeden önce hızlandırılır, ancak su türbin runner blades üzerinden aktığında basınç sabittir ve tüm iş çıkışı, suyun kinetik enerjisindeki değişimden kaynaklanmaktadır.

Tersine, Francis veya Kaplan (Propeller, blades ayarlanabilir değilse) türleri gibi reaksiyon türbinleri, türbin boyunca hareket ederken sudaki basınç değişimine dayanır ve enerjisini verir.

Türbinlerin nihai seçimi, yıllık enerji üretimi ve performans gereklilikleri dikkate alınarak potansiyel türbinlerin maliyet-fayda analizine bağlıdır.

Brüt düşü yüksekliği (H_{max}), **Şekil 5'**de gösterildiği gibi havza alanındaki ve türbin yerinde su yüzeyi seviyesi arasındaki dikey mesafedir. **Şekil 5'**de görülebileceği gibi, net kafa (H_n), besleme borusu boyunca sürtünme (h_f) ve lokal kayıplar (h_{loc}) ile üretilen hidrolik kayıplar gibi daha az brüt düşü yüksekliği olarak tanımlanır.



Şekil 5. Düşü Yüksekliği Dikkate Alındığı AAT'de Türbin Kurulum Şeması: Brüt Kafa (H_{max}), Net Düşü Yüksekliği (H_n), Hidrolik Sürtünme Kayıpları (h_f) ve Yerel Kayıplar (h_{loc})

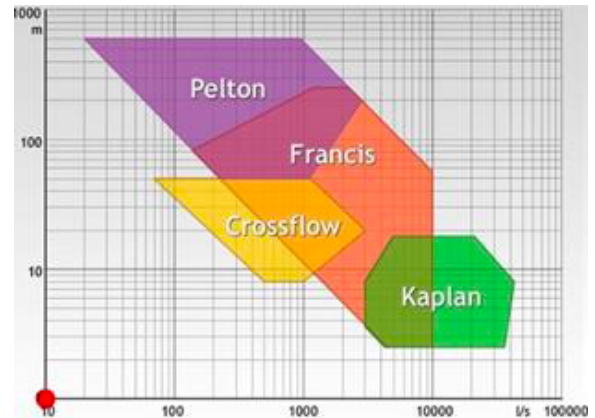
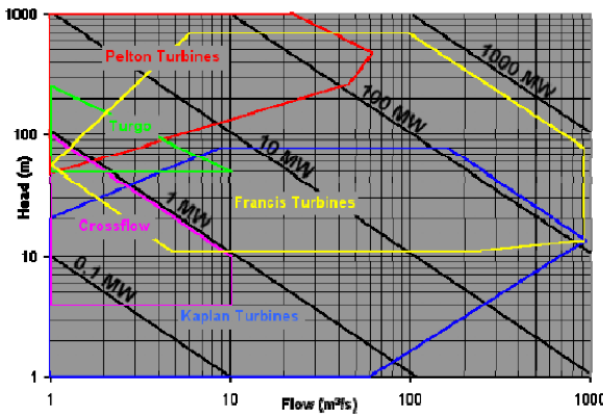
Bununla birlikte, ayarlanabilir kanatlara sahip Kaplan türbinleri gibi bazı modellerin, çok çeşitli akış hızı koşullarında yüksek verimlilik elde edilebildiğinden çeşitli düşü yüksekliği koşullarına iyi adapte edilebilir.

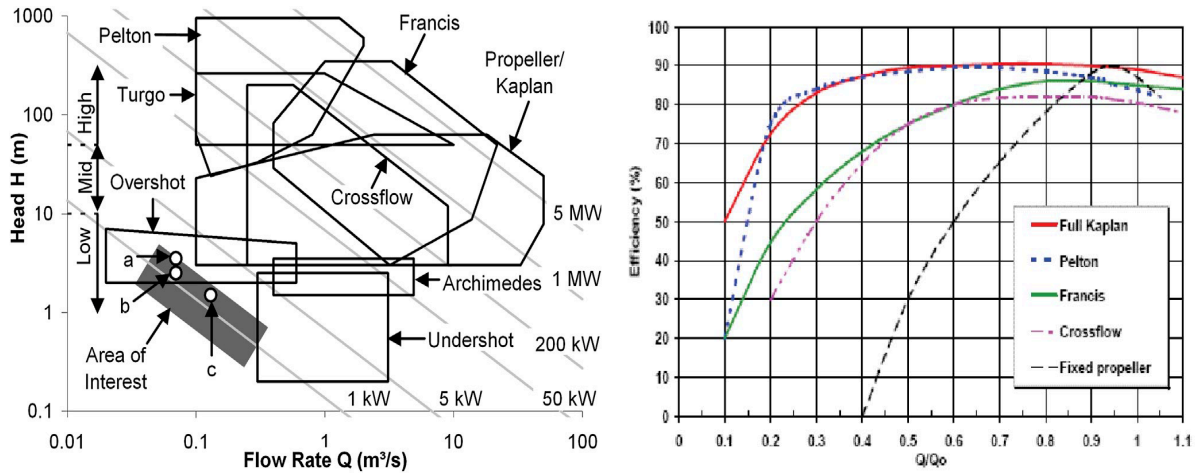
Bir türbin seçimini belirlemek için kriter, genellikle mevcut su düşü yüksekliğine dayanırken mevcut akış hızı daha az esas alınır. Genellikle, impulse türbinleri yüksek düşü yüksekliğine sahip bölgeler için daha sık kullanılırken, reaksiyon türbinleri genellikle düşük düşü yüksekliği bölgeler için kullanılır. Bununla birlikte, Kaplan türbinleri gibi belirli modellerin, ayarlanabilir bıçak aralığı ile, geniş akış veya kafa koşullarına iyi uyarlandığını unutmayın, çünkü tepe verimliliği geniş bir akış koşulları aralığında elde edilebilir. **Şekil 6**, türbinlerin türlerinin çoğunu potansiyel uygulama alanlarına göre sınıflandıran tipik bir grafiği göstermektedir.

Türbin seçiminde;

1. Artırılmış atıksuyun deşarjında düşü yüksekliği (m),
2. Artırılmış atıksuyun akış hızı (L/sn),

önemli iki parametredir.





Şekil 6. Türbin Tipleri, Uygulama Aralığı ve Verimlilikleri

Şekil 6 incelendiği zaman düşü yüksekliği (m) en uygun olan hidro türbin tipi Kaplan (propeller) olduğu görülmektedir.

Relatif deşarj (%) = Q/Q_{design} . Burada; Q_{design} türbin tasarım akış hızı ve Q türbinin çalışması sırasında herhangi bir noktada gerçek akış hızıdır.

Türbin verimlilik eğrilerinden görüleceği üzere, Kaplan ve Francis türbinleri en yüksek tasarım akışlarına, verimliliklerine ve güç çıkışlarına sahiptir. Bununla birlikte, bu türbinler düşük kısmi akış hızlarında yüksek performans elde etmek için kılavuz kanatlar ve ayarlanabilir kanatlar gibi karmaşık mekanizmalar kullandığından, bunlar aynı zamanda en pahalı türbinlerdir. Kaplan ve Francis türbinleri en pahalı türbinlerdir.

Şekil 6'de gösterilen türbin seçim çizelgesi, tüm AAT'leri için en yaygın olan düşük düşü yüksekliği ve düşük akış hızı senaryosu için uygun bir türbini seçmek için kullanılır. Uygun reaksiyon türbini seçenekleri Francis, Pervane ve Kaplan türbinleridir. PAT'ler de dikkate alınmalı. Kaplan türbini, geniş verimlilik aralığı ve düşük düşü yüksekliği ve yüksek akış uygulamaları için seçilebilir.

Şekil 6 incelendiği zaman en yüksek enerji verimli (%93) türbinin Kaplan ve en düşük enerji verimli (%60) türbinin PAT olduğu görülmektedir.

Şekil 6'de görüldüğü gibi türbinlerde maksimum verimliliğin Kaplan ve Propeller ile temin edileceği görülmektedir. Mikro türbinlerinde ortalama verimlilik %60 ila %80 arasında değişmektedir.

Genel olarak, PAT türbinleri, en düşük ortalama verimlilik ve güç potansiyeline sahipken diğer türbin tiplerinden 5 kat daha ucuz ve en düşük maliyete sahiptir. Bu, PAT'lerin daha ucuz ve diğer uygulamalarla uyumludur, çünkü (türbinlerin aksine) pompalar dünya çapında seri üretilmektedir. PAT'ın oldukça düşük maliyeti göz önüne alındığında, tesisteki büyük akışları yakalamak için paralel olarak birden fazla pompa kullanma potansiyeli olabilir. Ancak bu sonuçlarda sınırlamalar vardır. Bu tür güç çıkışları için gereken pompalar çok büyüktür ve türbin olarak kullanılmak üzere ters akış için endüstriyel modifikasyonlara ihtiyaç duymaları

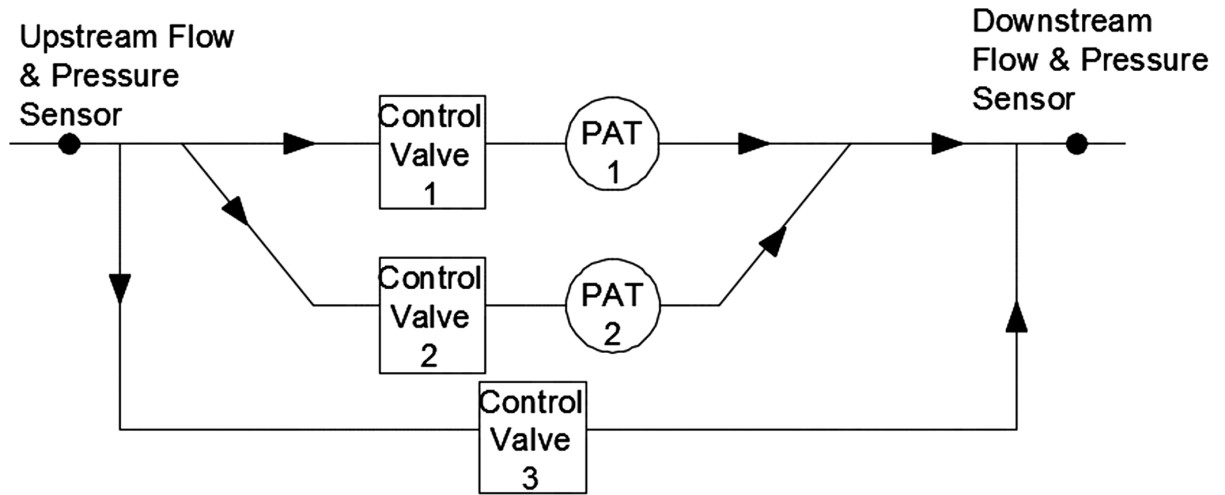
muhtemeldir. PAT en düşük maliyete sahipken, aynı zamanda en düşük güç çıkışına sahiptir. Güç çıkışını iyileştirmek için PAT, akış ve düşü yüksekliği değişimleri sırasında verimliliği stabilize etmek için hidrolik veya elektriksel olarak düzenlenebilir. PAT'nin en iyi verimlilik noktasına yakın çalışmasını sağlarken, düzenleme kullanımı tesis güvenilirliğini artıracak ve bakım maliyetlerini düşürecektir. PAT düzenlemesi için ek maliyetin artan güç çıkışı ve iyileştirilmiş tesis güvenilirliği ile doğrulanıp doğrulanmadığını belirlemek için bir maliyet-fayda analizi yapılmalıdır.

Türbin tasarım akış hızını aşan akış hızlarında (debiler) türbin baypass yapacağı varsayılmıştır. Bu nedenle, kaydedilen durumlarda günlük akış hızı, tasarım akış hızı değeri mikroHES çıktısını tahmin etmek için kullanılır.

PAT türbinleri, 500 kW kapasiteye kadar enerji üreten klasik türbinlere göre 10 kat daha ekonomiktir ama enerji verimliliği düşüktür.

Artılmış atıksu debisinde değişkenlik söz konusu ise paralel birkaç türbin ünitesi birlikte kurulabilir. Böylece suyun boşa akması önlenir.

PAT türbin sistemi akım şeması **Şekil 7**'de verilmiştir.



Şekil 7. PAT Sistemi Örnek Uygulama Şematik Diyagramı

Aşırı debilerde baypass sistemi olarak üçüncü vana kullanılır.

3.2 Jeneratör seçimi

Güç jeneratörleri esas olarak azaltılmış iki türün bir listesi olarak sınıflandırılabilir: senkron ve indüksiyon jeneratörleri diye.

Jeneratörler, MikroHES'lerden enerji üretimi için uygun olmalıdır

İndüksiyon jeneratörü (IG), izole bir güç kaynağı olarak geleneksel bir senkron jeneratöre göre birçok avantaj sunar. Azalan birim maliyeti, sağlamlık, daha az fırça (sincap kafesi yapısında), küçültülmüş boyut, ayrı DC kaynağı olmaması ve bakım kolaylığı, ciddi aşırı yüklerle ve kısa devrelere karşı kendini koruma, IG'nin başlıca avantajlarıdır. Kondansatörler, uyarma için kullanılır ve 10 ila 15 kW'tan daha az enerji üreten daha küçük sistemler için popülerdir. 50 Hz

frekansında sabit güç üretmek için tüm jeneratörler sabit bir hızda çalıştırılmalıdır. 3000 RPM hıza sahip iki kutuplu jeneratör, MikroHES’de pratik kullanımı çok yüksektir. 1500 RPM, dört kutuplu jeneratör yaygın olarak kullanılmaktadır. Jeneratör 1000 RPM'den daha düşük bir hızda çalışan jeneratörler, pahalı olur. Jeneratörün hızını türbinin düşük hızıyla eşleştirmek için; kayış ve/veya dişli kutusu gibi bir hız arttırıcı mekanizma gereklidir. Çıkış gücü mevcut farklı düşü yüksekliklerinde (minimum/maksimum) ve atıksu akış hızında ölçülmüştür. Farklı atıksu düşü yüksekliği için türbin jeneratör seti önerilir. Daha basit uyarma sistemi, daha düşük arıza seviyesi, uygun yatırım maliyeti ve daha az bakım gereksinimi nedeniyle indüksiyon jeneratörünün kullanımı MikroHES uygulamasında giderek daha popüler hale gelmektedir.

3.3 Cebri Boru Seçimi

Dengeleme tankını türbinin gövdesine bağlayan kapalı bir borudur. Cebri boru genellikle projedeki en pahalı kalemdir. Belirli bir cebri boru tasarım basıncı için hangi malzemenin kullanılacağına, yani borunun iç yüzeyinin pürüzlülüğüne, birleştirme yöntemine, ağırlığa karar verirken çeşitli faktörler dikkate alınmalıdır; kurulum kolaylığı, sahaya erişim, tasarım ömrü, bakım, hava koşulları, bulunabilirlik, görelî maliyet ve yapısal hasar olasılığı.

Boru hattının basınç derecesi kritiktir, çünkü boru iç duvarı maksimum su basıncına dayanacak kadar kalın ve dayanıklı olmalıdır, aksi takdirde patlama riski olacaktır. Cebri borudaki suyun basıncı, düşü yüksekliğine bağlıdır. Düşü yüksekliği ne kadar yüksekse basınç o kadar yüksek olur. Bir cebri boru için en yaygın olarak kullanılan malzemeler, uygunluğu, kullanılabilirliği ve onaylanabilirliği nedeniyle yumuşak çelik, yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) ve saflaştırılmamış polivinil klorürdür (UPVC). UPVC, en az sürtünme kayıpları, ağırlık, korozyon ve maliyet, vb. açısından yumuşak çelik ve HPDE üzerinde mükemmel performans gösterir. UPVC cebri boru, kanalizasyon enerji üretim sisteminde diğerlerine göre listelenen avantajlar nedeniyle kullanılmış ve bu alanda gelecekte yapılacak çalışmalar için önerilmiştir.

Cebri boru seçimi, özellikle cebri koru dizayn basıncı, yani, boruların iç yüzeylerinin pürüzlülüğü, bileşim noktası ve ağırlığı, kolay kurulması, saha için kabul edilebilirliği, ömrü, bakımı, hava şartları, temin edilebilirliği, yaklaşık maliyeti ve yapının zarar görme olasılığı önemlidir.

Cebri boruların iç yüzeyi pürüzsüz olmalı, boruların et kalınlığı maksimum basınca dayanıklı olmalıdır. Basınç, basma yüksekliğine bağlıdır. Cebri boru malzemesi olarak kullanılanlar **Tablo 4**'de verilmiştir.

Tablo 4. Cebri Boru Malzemelerinin Bileşenleri

S.No	Malzemeler	Sürtünme/ağırlık	Korozyon	Maliyet	Bileştirme	Basınç
1	Hafif çelik	***	***	****	****	****
2	HDPE	*****	*****	**	**	*****
3	UPVC	*****	****	****	****	*****

** Zayıf, *** Orta, **** İyi, ***** Mühemmel

Plastifiye edilmemiş PVC (UPVC) borulardan çok olumlu sonuçlar alınmaktadır.

4. MikroHES'le ENERJİ ÜRETİM HESAPLAMASI

AAT'lerde arıtılmış atıksu deşarjlarında mevcut olan potansiyel hidroelektrik güç aşığıdaki denklemlerle hesaplanır. MikroHES'lerde gerçek güç çıkışı (P_e) hesaplamak için, cebri borularda sürtünme kayıplarını ve türbin/jeneratörün verimliliğini dikkate almak gerekir. Enerjiyi elektriğe dönüştüren yeni modern türbin verimlilikleri %90'ın üzerindedir.

Potansiyel enerjiden elektrik enerjisi üretilecek mikroHES'ler için genel olarak verimlilik, yüksek düşü yüksekliğine ve akış hızına sahip sistemlerde meydana gelen daha yüksek toplam verimlilikle %60 ila 80 arasında değişir.

MikroHES'lerde enerji üretim miktarı aşığıdaki denklem ile hesaplanabilir.

$$P_e = P_h \times \eta = \eta \times Q \times g \times H \times \rho$$

Burada;

P_e ; Elektrik enerjisi gücü (kW),

P_h ; Hidrolik güç (kW),

η ; Mikrotürbün verimliliği, (birimsiz),

Q ; Atıksuyun debisi (m^3/sn)

ρ ; Arıtılmış atıksuyun yoğunluğu (kg/m^3)

g ; Yerçekimi ivmesi, 9.81, (m/sn^2)

H ; Atıksuyun hidrolik düşü yüksekliğine, (m), ($H_{max.} - h_f$)

η ; verimlilik faktörü (0,6 ila 0,8 arasında değişir). Burada verimlilik faktörü 0,7 alınmıştır. AAT'si atık sularına dayalı olarak önerilen sistemin güvenilirlik değerlendirmesi için kullanılmıştır.

Hesaplama örneęi;

Hidrolik düşü yüksekliğine; 1,5 m ve debisi 0.162 m^3/sn ise;

$$P_e = 0.7 \times 0.162 \times 1000 \times 9.81 \times 1.5 = 1.67 \text{ kW}$$

Hidrolik düşü yüksekliğine; 2,8 m ve debisi 0.162 m^3/sn ise;

$$P_e = 0.7 \times 0.162 \times 1000 \times 9.81 \times 2.8 = 3.1 \text{ kW}$$

olarak hesaplanmıştır. Aynı debisi ve farklı düşü yüksekliğine ile enerji üretim miktarının oldukça farklı olduğu görülmektedir. Burada düşü yüksekliğine oldukça önemlidir.

Diğer yandan yıllık enerji üretimi aşığıda verilen denklem ile hesaplanır.

$$\text{Yıllık enerji üretimi (kWh/yıl)} = P \text{ (kW)} \times C_p \times 24 \text{ saat} \times 365 \text{ gün}$$

Burada;

C_p ; Kapasite faktörü, türbinin ne kadar süre çalıştırıldığını ifade eder. Kapasite faktörü (%) = Yılda oluşun enerji (kWh/yıl)/ P_e (kW) $\times 24$ saat $\times 365$ gün denkleminde hesaplanır.

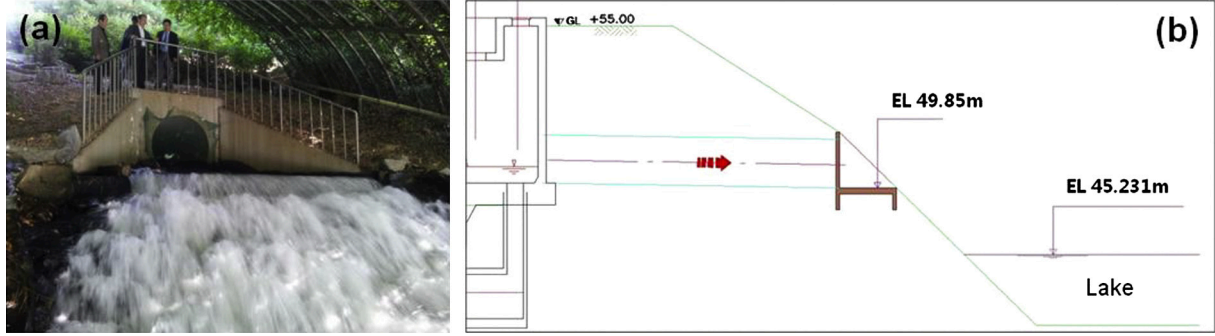
MikroHES tesisinin 8200 saat çalışacağı kabul edilmiştir. Buna göre yıllık enerji üretimi;

$$E_1 = P_e \times \text{Yıllık Çalışma Süresi} = 1.67 \times 8200 = 13.694 \text{ kWh}$$

Atıksu Artıma Tesislerine MikroHES

$E_2 = P_e \times \text{Yıllık Çalışma Süresi} = 3,10 \times 8200 = 25.420 \text{ kWh}$
olarak hesaplanır.

Şekil 8’de uygulamadaki bir örnekte hidrolik düşü yüksekliği 4,6 m’dir. Bu örnek uygulamada seçilen türbinin verimliliği %81’dir.



Şekil 8. (a) Atıksu Deşarj Alanı ve (b) Alan Seviyeleme Sonuçları



Şekil 9. AAT'de Düşü Yüksekliği

5. YATIRIM MALİYETİ

AAT'lerinde arıtılmış atıksuyun minimum debi 0,050 m³/sn ve yüksekliğin 3,5 m olması tavsiye edilir.

MikroHES yatırım maliyeti 1.300-8.000 ABD doları/kW (1.000-6.200 €/kW) arasında değişir. İşletme maliyeti ise yatırım bedelinin yaklaşık %1-4 arasında değişmektedir. İngiltere'de benzer bir çalışmada MikroHES yatırım maliyeti, 3.000–6.000 £/kW (3.700–7.400 €/kW) arasında değişmektedir.

AAT çıkındaki bir hidroelektrik türbini için inşaat maliyetlerinin önceden tahmin, kurulu kapasite kW başına 1.500 ABD dolarından (1.150 €) az ve 8.500 ABD dolarından (6.515 €) daha fazladır.

Düşü yüksekliğinin proje maliyeti üzerindeki etkisini hesaba katmak için İngiltere'de çeşitli büyüklükteki hidroelektrik santralleri için ampirik maliyet verilerine dayanan bir denklem geliştirilmiştir. Aşağıdaki denklemde, düşü yüksekliği 30 m'ye kadar olan MikroHES için İngiliz Sterlini cinsinden proje yatırım maliyetini (C_{pr}), güç çıkışı P, (kW) ve düşü yüksekliği, H, (m) ile ilişkilendirir. Bu denklemle proje yatırım maliyetini tahmin etmek için kullanılır. Tüm bölgeler için de minimum 50.000 € maliyet kabul edilmiştir.

$$C_{pr} = 25,000 \left(\frac{P}{H^{0.35}} \right)^{0.65} \quad \text{for heads} < 30 \text{ m}$$

Engelibeli arazide arıtma tesisleri için kurulum maliyetleri nispeten düşük olabilir. AAT'lere uygulanan bazı MikroHES için maliyet verileri mevcuttur.

Çeşitli türbin firmalarına ait tahmini türbin yatırım maliyetleri **Tablo 5'**de verilmiştir.

Tablo 5. Türbin Yatırım Maliyeti Tahminleri

Türbin Tipi	Türbin Maliyeti (€)
Kaplan	$31,196 \times P^{0.42} \times H^{-0.11}$
Francis	$25,698 \times P^{0.44} \times H^{-0.18}$
Propeller	$19,498 \times P^{0.42} \times H^{-0.11}$
PAT	€115 to €315 per kW

Tablo 5 incelendiği zaman enerji verimliliği düşük olan PAT'ın en düşük yatırım bedelli ve fizibil olduğu görülmektedir. Belirli bir yerde gerekli akış hızı ve düşü yüksekliği kombinasyonuna bağlı olarak, bazı pompa özellikleri piyasada daha az yaygın olabilir ve bu nedenle seri üretimin maliyet indirimlerinden yararlanamaz.

Her bir AAT için MikroHES projesi ile ilgili fizibilite çalışması yapılması fevkalade faydalı olur.

6. AMORTİSMAN SÜRESİ

MikroHES tesisleri amortisman süresini;

- Düşü yüksekliği,
- Atıksu debisi,
- Seçilen türbin tipi, verimliliği ve maliyeti,
- İşletme maliyeti,
- Elektrik enerjisi bedeli,

etkiler. Bu çalışmanın doğru olarak yapılması gereklidir. Düşük yatırım maliyetli ve düşük düşü yüksekliğine sahip türbinlerin amortisman süreleri daha kısadır.

MikroHES tesisleri 7/24 ve yılın 365 gün çalışır. 10 yıldan daha kısa olan amortisman süresi önemli ve geçerlidir. Geri ödeme süresinin maksimum 5 yıl olması tavsiye edilir.

“Amortisman süresi = yatırım bedeli/yıllık ekonomik getirisi” denklemi ile hesaplanır.

Her türbin için yatırım maliyeti, geri ödeme süreleri ve elektrik enerjisinden ekonomik faydalanılmasına göre hesaplanır. Türbinlerin montajı için ek maliyetlerin (inşaat işleri, jeneratörler ve elektrikli ekipman gibi) analize dahil edilmesi gerektiği vurgulanmalıdır. Çünkü bu maliyetler türbin seçimine bakılmaksızın benzer bedeller olarak değerlendirilebilir. Ek olarak, bu maliyetler, türbinin toplam yatırımın %30-50'sini temsil ettiği varsayılarak yaklaşık tüm proje maliyetlerine göre ölçeklendirilebilir.

Kapasitelerine bağlı olarak büyük, orta, küçük, mini, mikro ve piko sınıflara ayrılırlar. MikroHES sınıflandırılması **Tablo 6**'de verilmiştir. Mini, mikro ve pikoHES'ler, küçük HES'lerin alt kategorisidir. Bunlar kısaca **Tablo 6**'de sınıflandırılmıştır.

Tablo 6. MikroHES'lerin Sınıflandırılması

S. No	HES Tipleri	Tanımlama
1	Büyük hidro	100 MW'dan daha büyük ve genellikle büyük enerji şebekesini besleme
2	Orta hidro	15-100 MW genellikle şebekeyi besleme
3	Küçük hidro	1-15 MW genellikle şebekeyi besleme
4	Mini hidro	100 kW üzeri, fakat 1 MW altı ya bağımsız programlar yada daha sık şebekeyi besleme
5	Mikro hidro	5 kW dan 100 kW'a kadar şebekeden uzak küçük topluluklar veya kırsal sanayi için sağlanan enerji
6	Piko hidro	Birkaç yüz W'dan kW'a kadar

Tablo 7. MikroHES İstasyonları ve Kapasiteleri

Tipi	İstasyon Kapasitesi	Birim Kapasitesi
Mikro hidro	100 kW'a kadar	100 kW'a kadar
Mini-hidro	101 ila 2.000 kW	101 ila 1000 kW
Küçük hidro	2001 ila 25.000 kW	1001 ila 5000 kW

Bu sistemde, şehrin kanalizasyon yoluyla toplanan su ve daha sonra yüksek basınçta kanalizasyon suyunda arıtılmış veya yüksek hızda akan bu su, jeneratöre bağlanan türbin veya su çarkını çalıştırmak için kullanılabilir ve bu nedenle elektrik gücü güvenilir olduğu ve en az bakım ve bakım gerektirdiğinden daha popüler hale gelmektedir.

AAT'lerin giriş ve çıkışlarında hidroelektrik üretimi için potansiyel engeller, aşırı basma yüksekliği eksikliği, akış hızı değişimi, atık sudaki tıkanmalar nedeniyle türbin arızası veya atık sudaki askıda katı maddelerin sisteme zarar vermesi (özellikle tesis girişlerindeki kanalizasyondaki arıtılmamış atıksu) ve türbin bypass sistemi arasında sayılabilir.

7. KAYNAKLAR

1. Christine Power; Paul Coughlan; and Aonghus McNabola, “Microhydropower Energy Recovery at Wastewater-Treatment Plants: Turbine Selection and Optimization”, *J. Energy Eng.*, 2017, 143(1).
2. Archana Tamrakar, S.K. Pandey and S.C. Dubey, “Hydro Power Opportunity in the Sewage Waste Water”, *American International Journal of Research in Science, Technology, Engineering & Mathematics*, 2015.
3. Digisha Patel, Hemali Jardosh, “Application of Hydropower Technology in Wastewater Treatment Plants Step Towards Sustainable Environment”, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2018.
4. H. Beltran, R. Vidal, L. Basiero, J.M. Santos, J.A. Basiero and E. Belenguer, “Micro hydro installation analysis in a wastewater treatment plant”, *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'14) Cordoba (Spain)*, 8th to 10th April, 2014.
5. Kyu-Jung Chae, In-Soo Kim, Xianghao Ren, Kyeong-Ho Cheon, “Reliable energy recovery in an existing municipal wastewater treatment plant with a flow-variable micro-hydropower system”, *Energy Conversion and Management* 101 (2015) 681–688.
6. Kyu-Jung Chae, Jihoon Kang, “Estimating the energy independence of a municipal wastewater treatment plant incorporating green energy resource”, *Energy Conversion and Management* 75 (2013) 664–672.
7. M.A. Che Munaaim, N. Razali, A. Ayob, N. Hamidin, and M.A. Othuman Mydin, “Potential of Micro Hydroelectric Generator Embedded at 30,000 PE Effluent Discharge of Sewerage Treatment Plant”, *E3S Web of Conferences* 34, 02037 (2018).
8. Christine Power, Aonghus McNabola, Paul Coughlan, “Development of an evaluation method for hydropower energy recovery in wastewater treatment plants: Case studies in Ireland and the UK”, *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 7 (2014) 166–177.
9. Eva Gómez-Llanos, Juana Arias-Trujillo, Pablo Durán-Barroso, José M. Ceballos-Martínez, Jesús A. Torrecilla-Pinero, Carlos Urueña-Fernández and Miguel Candel-Pérez, “Hydropower Potential Assessment in Water Supply Systems”, *Proceedings 2018*, 2, 1299; doi:10.3390/proceedings2201299.
10. Ahmad I. Abbas, Mohammad D. Qandil, Muhannad R. Al-Haddad, Mandana S. Saravani, Ryoichi S. Amano, “UTILIZATION OF HYDRO-TURBINES IN WASTEWATER TREATMENT PLANTS (WWTPS)”, *Proceedings of the ASME 2018 12th International Conference on Energy Sustainability ES2018 June 24-28, 2018, Lake Buena Vista, FL, USA*.
11. V. Berger, A. Niemann, T. Frehmann and H. Brockmann, “Advanced energy recovery strategies for wastewater treatment plants and sewer systems using small hydropower”, *Water Utility Journal* 5: 15-24, 2013.
12. Dilek ERKAN, Tülay YILMAZ, Amine YÜCEL, Ahmet YILMAZ, Ahmet TEL, Deniz UÇAR, “Atıksu Arıtma Tesislerinde Enerji Kazanımı için Mikro Ölçekte Hidroelektrik Santrallerin Uygulanabilirliği”, *HU Muh. Der.* 02 (2018) p.20-25.