

OZMOTİK ENERJİNİN FİZİĞİ VE UYGULAMA ALANLARI : 1

Hazırlayan : Yüksel Atakan Dr. Radyasyon Fizikçisi ybatakan4@gmail.com 15.06.2026 (YZ destekli bilgiler) 1

1. Giriş

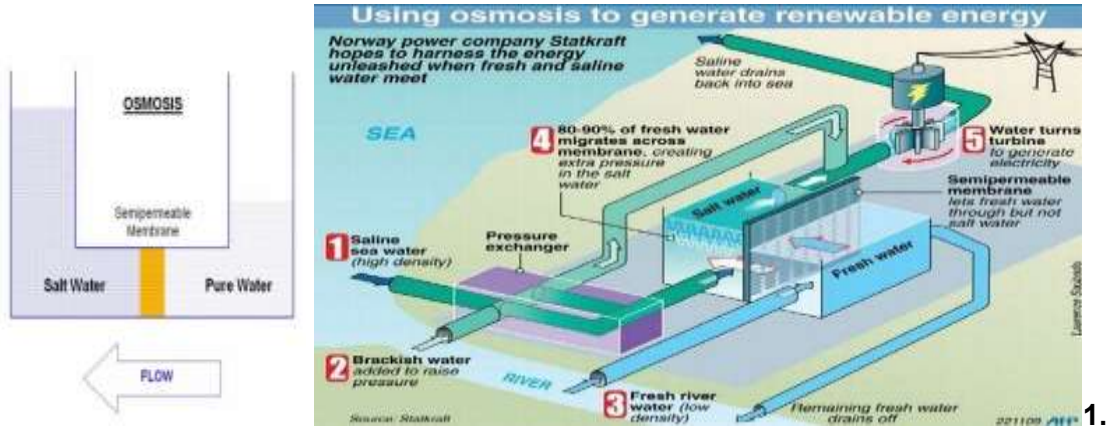
Ozmotik enerji, tuzlulukları farklı iki su kütlesi (örneğin nehir suyu ile deniz suyu) karıştırıldığında ortaya çıkan serbest enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesidir. Bu enerji türü literatürde “mavi enerji (blue energy)” olarak da adlandırılır.

Temel prensip, yarı geçirgen bir zarın iki tarafındaki kimyasal potansiyel farkından yararlanılmasıdır. Zar yalnızca su moleküllerini geçirirken çözünmüş tuz iyonlarını geçirmez. Böylece su, düşük tuz derişiminden yüksek tuz derişimine doğru hareket eder ve bu hareket enerji üretiminde kullanılabilir.

2. Ozmotik Olayın Fiziği

2.1. Yarı Geçirgen Zar ve Su Geçişi

Tatlı su ile tuzlu su arasına yarı geçirgen bir zar yerleştirildiğinde tatlı su molekülleri yarı iletken zarın arkasına geçerler.



Şekil
Ozmotik Geçişin Temel İlkesi ve Elektrik Enerji Üretimi

Şekilde görüldüğü gibi:

- Tatlı su tarafında tuz derişimi düşüktür.
- Tuzlu su tarafında tuz derişimi yüksektir.
- Zar yalnızca suyu geçirir, Na^+ ve Cl^- iyonlarını geçirmez.

Bu hareket sonucunda tuzlu tarafta bir basınç oluşur. Bu basınca ozmotik basınç denir.

2.2. Ozmotik Basınç Denklemi

Seyreltik çözeltiler için ozmotik basınç Van't Hoff denklemiyle ifade edilir:

$$\Pi = iCRT$$

Burada:

- Π : ozmotik basınç (Pa)
- i : Van't Hoff katsayısı
- C : molar derişim (mol/m^3)
- R : gaz sabiti ($8.314 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$)
- T : mutlak sıcaklık (K)

Bu denklem, ideal gaz yasasına benzer bir davranış gösterir ve çözelti derişimi arttıkça ozmotik basıncın da arttığını gösterir.

3. Deniz Suyu ve Tatlı Su Arasındaki Basınç Farkı

Deniz suyunun tuzluluğu ortalama %3,5'tir. Tatlı su ile deniz suyu arasında oluşabilecek teorik ozmotik basınç yaklaşık 25–30 bar düzeyindedir.

Bu basınç yaklaşık olarak:

- 250–300 metre yüksekliğinde bir su sütununun oluşturduğu hidrostatik basınca eşdeğerdir.

Dolayısıyla nehirlerin denize döküldüğü bölgeler önemli bir enerji potansiyeline sahiptir.

Tablo 1. Tipik Su Türlerinin Tuzluluk ve Ozmotik Basınç Değerleri

Su Türü	Ortalama Tuzluluk	Yaklaşık Ozmotik Basınç
Tatlı su	%0–0,05	≈ 0 bar
Brakik su	%0,05–3	5–20 bar
Deniz suyu	%3,5	25–30 bar

3.1 Şekilde gösterilen sistem, Norveçli enerji şirketi Statkraft tarafından geliştirilen **basınç geciktirmeli ozmoz (Pressure Retarded Osmosis - PRO)** prensibine dayanmaktadır. Deniz suyu ile tatlı su arasındaki tuzluluk farkından doğan ozmotik basınç türbini döndürmek için kullanılır.

Ozmotik basıncı Van't Hoff denklemi ile yaklaşık olarak hesaplayabiliriz:

$$\Pi = iCRT$$

Burada:

- Π = ozmotik basınç (Pa)
- i = Van't Hoff katsayısı
- C = molar derişim (mol/m^3)
- R = $8,314 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$
- T = sıcaklık (K)

Örnek Hesap

Deniz suyu için tipik değerler:

- Tuzluluk $\approx 35 \text{ g/L}$
- Ana tuz: NaCl
- NaCl mol kütlesi = $58,44 \text{ g/mol}$
- Sıcaklık = $25^\circ\text{C} = 298 \text{ K}$
- Van't Hoff katsayısı (NaCl için) ≈ 2

1. Molar derişim

$$C = \frac{35}{58.44} = 0.599 \text{ mol/L}$$

1 L = 0,001 m³ olduğundan:

$$C = 0.599 \times 1000$$

$$C = 599 \text{ mol/m}^3$$

2. Ozmotik basınç

Van't Hoff denkleminde yerleştirilim: $\Pi = 2 \times 599 \times 8.314 \times 298$

$$\Pi \approx 2.97 \times 10^6 \text{ Pa (Paskal)}$$

ya da:

$$\Pi \approx 2.97 \text{ MPa}$$

1 bar = 100 000 Pa olduğundan:

$$\Pi \approx 29.7 \text{ bar}$$

Sonucun Yorumu

Yaklaşık **30 barlık ozmotik basınç**, deniz suyu ile nehir suyunun karışmasından elde edilebilecek teorik maksimum basınçtır.

PRO santralinde bunun tamamı kullanılamaz. Membran kayıpları nedeniyle genellikle:

- İşletme basıncı $\approx 10\text{--}15 \text{ bar}$
- Verim $\approx \%30\text{--}50$

olur.

Bu nedenle pratikte türbine aktarılan basınç yaklaşık:

12-15 bar kadardır.

1 m³/s Tatlı Su İçin Güç Hesabı

Tatlı su debisi:

$$Q = 1 \text{ m}^3/\text{s}$$

Basınç:

$$P = 1.5 \times 10^6 \text{ Pa}$$

Hidrolik güç:

$$P = \Delta p Q$$

$$P = 1.5 \times 10^6 \times 1$$

$$P = 1.5 \times 10^6 \text{ W}$$

$$P = 1.5 \text{ MW}$$

Türbin ve sistem verimi %80 kabul edilirse:

$$P_{\text{elektrik}} = 1.5 \times 0.8$$

$$P_{\text{elektrik}} \approx 1.2 \text{ MW}$$

Statkraft Ölçeğinde Bir Örnek

Eğer tesise saniyede 10 m³ nehir suyu gelirse:

$$Q = 10 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$P_{\text{elektrik}} \approx 12 \text{ MW}$$

Bu güç:

- yaklaşık 10.000–12.000 Avrupa hanesinin elektrik tüketimine,
- küçük bir hidroelektrik santralin üretimine eşdeğerdir.

Özet Tablo

Parametre	Değer
Deniz suyu tuzluluğu	35 g/L
NaCl derişimi	599 mol/m ³
Teorik ozmotik basınç	29,7 bar
Kullanılabilir basınç	12–15 bar
Debi	1 m ³ /s
Elektrik gücü	$\approx 1,2 \text{ MW}$
Debi	10 m ³ /s
Elektrik gücü	$\approx 12 \text{ MW}$

Önemli not: Gerçek Norveç Statkraft PRO tesislerinde hesaplamalar yalnızca Van't Hoff denkleminde dayanmaz. Membran geçirgenliği, tuz geri difüzyonu, sınır tabaka etkileri ve hidrolik kayıplar da dikkate alınır. Bu nedenle gerçek güç üretimi kuramsal değer genellikle %30–50'si

düzeyindedir. Ancak yukarıdaki örnek, şekildeki sistemin fiziksel temelini anlamak için oldukça iyi bir mühendislik yaklaşımıdır.

3. Kısaca: Ozmotik Enerji Üretim Yöntemleri

3.1. Basınç Gecikmeli Ozmoz (PRO)

Bu yöntemde tatlı su, yarı geçirgen zar üzerinden tuzlu su tarafına geçer. Tuzlu tarafta basınç artar ve bu basınç bir türbini döndürerek elektrik üretir.

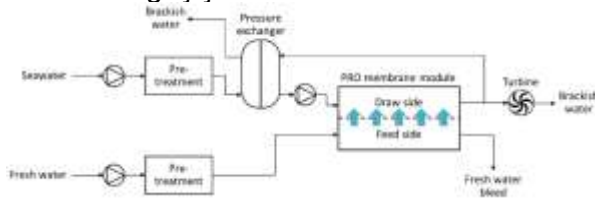
Şekil 2. Basınç Gecikmeli Ozmoz (PRO) Sistemi

1. Tatlı su membran modülüne girer.

- Tatlı su, yarı geçirgen membranın düşük tuzluluk tarafına beslenir.
- Membran suyu geçirir ancak tuz iyonlarını geçirmez.

2. Su tuzlu tarafa geçerek basıncı artırır.

- Kimyasal potansiyel farkı nedeniyle su molekülleri tuzlu tarafa hareket eder.
- Bu geçiş tuzlu taraftaki sıvı hacmini ve basıncını yükseltir.



3. Basınçlı tuzlu su türbini döndürür.

- Oluşan basınçlı akış bir türbin veya hidrolik motora yönlendirilir.
- Türbinin dönmesi jeneratör aracılığıyla elektrik üretir.

PRO sistemlerinin temel avantajı sürekli çalışabilmesidir; ancak membran maliyetleri ve kirlenme önemli teknik sorunlardır.

4. Küresel Potansiyel ve Uygulama Alanları

Nehirlerin denizlere döküldüğü bölgeler ozmotik enerji için en uygun alanlardır. Araştırmalar küresel teknik potansiyelin yaklaşık 1000–2000 TWh/yıl düzeyinde olduğunu göstermektedir.

Önemli Potansiyel Bölgeler



- Ren Deltası (Hollanda)
- Amazon Nehri Ağız (Brezilya)
- Mississippi Deltası (ABD)

Bu bölgelerde tatlı su ve deniz suyu sürekli olarak karıştığından enerji üretimi teorik olarak mümkündür.

5. Avantajlar ve Zorluklar

5.1. Avantajlar

- Sürekli ve öngörülebilir enerji kaynağıdır.
- Güneş ve rüzgâr gibi hava koşullarına bağımlı değildir.
- Karbon salımı çok düşüktür.
- Nehir ağzlarında çevresel etkisi görece sınırlı tesisler kurulabilir.

5.2. Zorluklar

- Membran teknolojileri pahalıdır.
- Tuz ve biyolojik kirlenme (fouling) verimi düşürür.
- Enerji dönüşüm verimi henüz hidroelektrik veya güneş enerjisi kadar yüksek değildir.
- Büyük ölçekli ticari uygulamalar hâlen sınırlıdır.

6. Sonuç

Ozmotik enerji, tatlı su ile deniz suyu arasındaki tuzluluk farkından yararlanarak elektrik üretmeyi amaçlayan yenilikçi bir yenilenebilir enerji teknolojisidir. Temel fiziksel mekanizma, yarı geçirgen zarlar üzerinden gerçekleşen su geçişi ve bunun oluşturduğu ozmotik basınçtır.

Günümüzde membran maliyetleri ve kirlenme gibi teknik sorunlar nedeniyle yaygınlaşması sınırlı olsa da, özellikle nehir ağzlarında önemli bir temiz enerji potansiyeli sunmaktadır. Membran teknolojilerindeki gelişmeler, ozmotik enerjinin gelecekte daha rekabetçi bir enerji kaynağı hâline gelmesini sağlayabilir.

Kaynaklar//

- Loeb, S. (1975). "Osmotic Power Plants." *Science*, 189(4203), 654–655.
- Pattle, R. E. (1954). "Production of Electric Power by Mixing Fresh and Salt Water in the Hydroelectric Pile." *Nature*, 174, 660.
- Post, J. W., et al. (2007). "Salinity-gradient power: Evaluation of pressure-retarded osmosis and reverse electrodialysis." *Journal of Membrane Science*, 288(1–2), 218–230.
- van't Hoff, J. H. (1887). "The Function of Osmotic Pressure in the Analogy between Solutions and Gases." *Proceedings of the Physical Society of London*, 9, 307–315.
- World Energy Council (2022). *Blue Energy and Salinity Gradient Power Technologies Report*.
- IEA (International Energy Agency). "Ocean Energy Technology Overview."