İYYÜ Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Hakemli-Akademik
(IYYU Journal of Faculty of Engineering and Architecture, Refereed-Academic)
ISSN *(International Standard Serial Number)*: 3149-8442
Cilt *(Volume)*: 1, Sayı *(Issue)*: 1, Sayfalar *(Pages)*: 25-28, Yıl *(Year)*: 2026

YENİ NESİL YAPAY BÖBREK TEKNOLOJİLERİ VE KLİNİK UYGULAMALARDAKİ GELECEĞİ

(New Generation Artificial Kidney Technologies and Their Future in Clinical Applications)

Bahar Mammadlı, Sezen Canım Ateş *

* Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
sezen.canimates@yeniyuzyil.edu.tr
(Biomedical Engineering Department, College of Engineering and Architecture, Istanbul Yeni Yuzyil University, Istanbul, Turkey)*

Alınma Tarihi: 03 *Ağustos 2025* Kabul Tarihi: 28 *Ağustos 2025* Yayın Tarihi: Şubat *2026*
(Received: *03 August 2025* Accepted: *28 August 2025* Published: *February 2026*)
Dijital Nesne Tanımlayıcı *(Digital Object Identifier)*: https://doi.org/10.66125/0.2026.4

Derleme Makalesi
(Review Paper)

ÖZET

Böbrekler, vücudun sıvı dengesini düzenleyen, elektrolitleri kontrol eden, toksik atıkları kandan süzen ve hormon üretiminde görev alan hayati organlardır. Kronik böbrek yetmezliği (KBY) gibi hastalıklarda bu fonksiyonlar kalıcı olarak bozulur ve hastaların yaşamlarını sürdürebilmeleri için diyaliz ya da organ nakli gerekir. Geleneksel hemodiyaliz sistemleri genellikle hastaları haftada üç gün hastaneye bağımlı hale getirir, büyük hacimli diyalizat sıvıları gerektirir ve uzun vadede yaşam kalitesini olumsuz etkiler. Bu sebeple, taşınabilir, giyilebilir veya vücut içine yerleştirilebilen (implante edilebilir) yapay böbrek sistemleri giderek önem kazanmaktadır. Bu çalışmada, son yıllarda geliştirilen yenilikçi yapay böbrek teknolojileri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Ninhidrin bazlı polimer sorbentler ve molibden disülfür (MoS_2) gibi nano-yapılar sayesinde üre, kreatinin ve ürik asit gibi üremik toksinlerin uzaklaştırılmasında önemli ilerlemeler sağlandığı görülmüştür. Ayrıca biyomimetik membranlar, canlı hücre içeren biyoreaktör modülleri ve sensör destekli akıllı kontrol sistemleri; hem biyolojik uyumluluğu artırmakta hem de hasta-özel tedavi uygulamalarına olanak tanımaktadır. Bu teknolojiler sadece mühendislik açısından değil, aynı zamanda sosyal, klinik ve ekonomik boyutlarıyla da gelecekteki sağlık çözümlerine yön verecek potansiyele sahiptir.

Anahtar Kelimeler: *Yapay böbrek, taşınabilir diyaliz, $MoS_„$ ninhidrin, biyouyumlu membran*

ABSTRACT

The kidneys are vital organs responsible for regulating fluid balance, maintaining electrolyte levels, filtering toxic waste from the blood, and producing essential hormones. In chronic kidney disease (CKD), these functions are permanently impaired, requiring patients to rely on dialysis or organ transplantation to survive. Traditional hemodialysis systems often bind patients to hospital-based treatment three times a week, require large volumes of dialysate solution, and negatively affect long-term quality of life. Therefore, the development of portable, wearable, or implantable artificial kidney systems has become increasingly important. This study provides a comprehensive overview of recent advancements in artificial kidney technologies. It is seen that, innovations such as ninhydrin-based polymeric sorbents and nanostructured materials like molybdenum disulfide (MoS_2) have demonstrated significant efficiency in the removal of uremic toxins such as urea, creatinine, and uric acid. In addition, biomimetic membranes, bio-reactor modules containing living renal cells, and sensor-supported intelligent control systems enhance both biocompatibility and patient-specific treatment capabilities. These technologies not only represent engineering progress but also hold great promise for future healthcare solutions across social, clinical, and economic dimensions.

Keywords: *Artificial kidney, portable dialysis, MoS_2, ninhydrin sorbent, biomimetic membrane*

1. Giriş

Böbrekler, vücutta birçok hayati fonksiyonu yerine getiren, çift organ yapısına sahip filtreleme sistemleridir. Bu organlar, vücuttaki su ve elektrolit dengesini korumak, kan basıncını düzenlemek, hormon üretimini sağlamak ve metabolik atıkları kandan süzerek idrar yoluyla uzaklaştırmak gibi temel görevleri üstlenir. Ancak çeşitli nedenlerle (örneğin diyabet, hipertansiyon, kalıtsal hastalıklar) böbrek fonksiyonlarının geri dönüşümsüz şekilde kaybı, KBY ile sonuçlanır. KBY hastalarının yaşamlarını sürdürebilmeleri için ya sürekli diyaliz tedavisine girmeleri ya da böbrek nakli olmaları gerekir (1).

Günümüzde uygulanan en yaygın yöntem olan hemodiyaliz, haftada genellikle üç gün, her biri 3–4 saat süren merkez temelli tedavi seansları ile gerçekleştirilir. Ancak bu sistemler; sabit, taşınamaz yapıları, yüksek hacimli diyalizat kullanımı (yaklaşık 120 litre/seans), diyet ve sıvı kısıtlamaları, enfeksiyon riski ve sınırlı hareket özgürlüğü nedeniyle hastaların yaşam kalitesini ciddi şekilde düşürmektedir. Aynı zamanda tedavi maliyetlerinin yüksekliği ve sağlık merkezlerine erişim sorunları da özellikle gelişmekte olan ülkelerde önemli bir sorun teşkil etmektedir (2).

Tüm bu kısıtlamalar, son yıllarda bilim insanlarını taşınabilir, giyilebilir ve hatta vücuda implante edilebilir yapay böbrek sistemleri geliştirmeye yönlendirmiştir. Bu yeni nesil teknolojiler, daha az hacimde sıvı kullanarak toksinleri uzaklaştırabilen, biyouyumlu ve hastaya özel çözümler sunan yenilikçi yaklaşımlar içermektedir. Geliştirilen sistemlerde özellikle adsorpsiyon temelli sorbentler, nano-yapılar, biyouyumlu membranlar ve akıllı sensör destekli kontrol üniteleri gibi çok disiplinli teknolojiler ön

plana çıkmaktadır (3).

Bu derleme çalışması kapsamında, günümüzde yapay böbrek alanında yapılan güncel araştırmalar; kullanılan malzemeler, teknolojik sistemler ve biyomedikal yaklaşımlar çerçevesinde ele alınarak değerlendirilmiştir. Amaç, hem mühendislik hem de klinik bakış açısıyla geleceğin böbrek replasman tedavilerine ışık tutacak potansiyel çözümleri ortaya koymaktır.

2. Taşınabilir ve Giyilebilir Yapay Böbrekler

Kronik böbrek yetmezliği hastalarının yaşamlarını sürdürebilmesi için uygulanan geleneksel hemodiyaliz yöntemleri, sabit klinik merkezlere bağımlı olması, seans başına yaklaşık 120 litre diyalizat sıvısı gerektirmesi ve hastanın hareket özgürlüğünü ciddi biçimde kısıtlaması gibi nedenlerle önemli sınırlamalara sahiptir. Bu durum, özellikle yaşlı, çalışmak zorunda olan veya kırsal bölgelerde yaşayan hastalar açısından yaşam kalitesini olumsuz etkileyen önemli bir engel oluşturmaktadır. Bu bağlamda, son yıllarda geliştirilmekte olan taşınabilir ve giyilebilir yapay böbrek sistemleri, bu sınırlamaları aşmaya yönelik çığır açıcı çözümler sunmaktadır (4).

Taşınabilir yapay böbrekler, genellikle küçük hacimli, batarya destekli, hastanın yanında taşıyabileceği şekilde tasarlanmış, düşük debili ve geri dönüştürülebilir diyalizat kullanan sistemlerdir. Bu sistemlerde en büyük teknolojik engel, üre, kreatinin, ürik asit ve fosfat gibi üremik toksinlerin küçük hacimdeki diyalizat içerisinde etkili biçimde uzaklaştırılabilmesidir. Geleneksel sistemlerde bu görev, büyük hacimli diyalizatla sağlanırken, taşınabilir sistemlerde adsorpsiyon temelli sorbentler ve yeniden kullanılabilir filtrasyon üniteleri ön plana çıkmaktadır.

Bu kapsamda yapılan çalışmalarda özellikle ninhidrin tabanlı gözenekli polimer yapılar, yüksek üre bağlama kapasiteleriyle dikkat çekmiştir. Tek adımda sentezlenebilen bu sorbentler, küçük hacimde dahi üreyi etkili biçimde uzaklaştırarak rejeneratif diyaliz sistemlerinin gelişimine katkı sağlamaktadır. Ayrıca elektrokimyasal yıkım sistemleri, enzimatik hidroliz, iyon değiştirici reçineler gibi yöntemler de literatürde alternatif yaklaşımlar olarak değerlendirilmiştir (5).

Bir diğer önemli gelişme ise geniş katman aralıklı MoS_2 gibi nano-malzeme temelli sorbentlerin kullanımıdır. MoS_2, yüksek yüzey alanı, biyouyumluluğu ve kimyasal bağ yapabilme özelliği sayesinde üre, kreatinin ve ürik asit gibi molekülleri yüksek seçicilikle adsorbe edebilmektedir (6). Ayrıca bu malzemeler, protein gibi büyük molekülleri geçirmeyerek seçici filtrasyon sağlamaktadır. Bu da hem üreaz enzimi kullanımını ortadan kaldırmakta, hem de sistemin daha kararlı ve uzun ömürlü olmasına imkân tanımaktadır.

Giyilebilir yapay böbrek sistemleri ise genellikle bir kemer, çanta veya giysi içerisine entegre edilen daha kompakt cihazlardır. Bu cihazlar, hastanın günlük yaşamına entegre olabilen, sürekli çalışan ve genellikle düşük akış hızlarında çalışan mini-diyaliz sistemleridir. Giyilebilir sistemlerde tasarımın hafiflik, sessizlik, batarya süresi ve güvenlik gibi kriterlere uygun olması gerekmektedir. Ayrıca bu sistemlerde mikroakışkan tabanlı membran teknolojileri, biyosensör destekli geri bildirim kontrol üniteleri, alarm sistemleri ve kendi kendini temizleyebilen filtre modülleri kullanılmaktadır.

Özellikle son dönemde yapılan çalışmalarda, giyilebilir sistemlerin sorbent modüllerinde kullanılan malzemeler; karbonlaştırılmış selüloz aerojeller (C-CAJ), nanofiber membranlar, grafen oksit kompozitleri ve biyoaktif kaplamalı hibrid yapılar gibi gelişmiş fonksiyonel bileşenlerden oluşmaktadır. Bu sayede yalnızca üre değil, aynı zamanda ürik asit, kreatinin ve fosfat gibi çok sayıda üremik toksin aynı anda tutulabilmekte; aynı zamanda bakteriyel bulaş ve biyofilm oluşumu gibi istenmeyen etkiler de azaltılmaktadır (7).

Taşınabilir ve giyilebilir yapay böbrekler üzerinde yapılan tüm bu çalışmalar, yalnızca mühendislik başarısı değil, aynı zamanda hastanın tedaviye erişimini kolaylaştıracak, bağımsızlığını artıracak ve yaşam kalitesini iyileştirecek sosyal bir dönüşüm potansiyeli de taşımaktadır. Henüz tam anlamıyla klinik uygulamaya geçmemiş olsa da, bu sistemlerin test prototipleri insan üzerinde kısa süreli deneylerle başarı göstermeye başlamış ve FDA gibi otoritelerin dikkatini çekmiştir. Önümüzdeki yıllarda daha küçük, daha etkili, daha ucuz ve daha entegre çözümlerin ortaya çıkmasıyla birlikte taşınabilir ve giyilebilir yapay böbreklerin, geleneksel diyaliz sistemlerinin yerini alma potansiyeli oldukça yüksektir.

3. İmplante Edilebilir Yapay Böbrek Sistemi (İBAK)

Geleneksel diyaliz yöntemleri ve taşınabilir sistemler, böbrek yetmezliği tedavisinde önemli gelişmeler sunsa da hâlâ günlük yaşamda tam bağımsızlık sağlamaktan uzaktır. Hastaların tedaviye sürekli bağlı olması, yaşam kalitesini düşürmekte ve sosyal yaşama katılımı sınırlamaktadır. Bu nedenle, son yıllarda üzerinde çalışılan en ileri yapay böbrek yaklaşımı vücut içine yerleştirilebilen, yani implante edilebilir yapay böbrek sistemleridir (İBAK).

İBAK sistemlerinin temel hedefi, insan vücuduna cerrahi olarak yerleştirilebilecek, dış enerji veya büyük hacimli sıvı ihtiyacı duymadan çalışabilecek, biyolojik yapılarla uyumlu ve uzun ömürlü bir cihaz geliştirmektir. Bu sistemler, yalnızca bir filtreleme ünitesi değil, aynı zamanda biyolojik geri emilim (reabsorpsiyon) süreçlerini de taklit edebilecek kapasitede, çok katmanlı ve modüler olarak tasarlanmaktadır (8).

İBAK sistemleri genellikle iki temel modülden oluşur:

• **Hemorheolojik Filtrasyon Modülü (HFM):** Bu modül, glomerül benzeri bir yapıyla kandan toksinleri süzmek amacıyla geliştirilmiştir (9). Özellikle silikon bazlı nanoporlara sahip filtreleme sistemleri kullanılır. Bu nanoporlar, yaklaşık 5–10 nanometre çapındadır ve:

  • Üre, kreatinin gibi küçük toksinleri geçirirken
  • Albumin, globulin gibi büyük molekülleri tutar

• **Biyo-reaktör Modülü (BRM):** Bu modülde, gerçek böbrek tübül hücrelerine benzer şekilde çalışan canlı hücreler (çoğunlukla proksimal tübül epitel hücreleri) yerleştirilir (10). Bu hücreler, sodyum, glukoz ve su gibi molekülleri geri emerek homeostazı sağlar. Ayrıca, hormon sinyallemeleri ve asit-baz dengesi gibi işlevlerde de katkı sunar.

İBAK sisteminin en dikkat çekici özelliği, herhangi bir elektrik kaynağına ya da pompalama sistemine ihtiyaç duymadan, vücudun kendi kan basıncı ile çalışabilecek şekilde tasarlanmış olmasıdır. Cihaz, kalpten gelen kanı doğrudan alır, toksinleri filtreler ve geri emilmesi gereken maddeleri seçici şekilde hücre tabakalarından geçirir. Bu süreç sonunda ortaya çıkan sıvı, idrar olarak mesaneye yönlendirilir. Bu yapı sayesinde hasta, herhangi bir makineye bağlı kalmadan, vücudu içinde sürekli çalışan bir “mikro böbreğe” sahip olur.

İBAK cihazlarında kullanılan membranlar ve yüzeyler mutlaka biyouyumlu, kanla temas edebilecek özellikte, pıhtılaşmayı tetiklemeyen ve bağışıklık sistemini uyarmayan yapıda olmalıdır. Bunun için, Silikon elastomerler; Titanyum kaplamalar; Polietersülfon gibi polimerik yüzeyler kullanılmaktadır. Ayrıca, cihazın çevresel dokularla etkileşimde fibrozis oluşturmaması, protein birikimi yapmaması ve hücre dışı matris oluşumunu tetiklememesi gerekir. Bu doğrultuda yapılan deneysel çalışmalar, hayvan modellerinde olumlu sonuçlar vermiştir.

İBAK sistemleri ile ilgili birçok preklinik çalışma, özellikle küçük hayvan modelleri (fare, tavşan) üzerinde yürütülmüştür. Bu çalışmalarda:

• Cihazın kanla sorunsuz çalıştığı
• Filtrasyon kapasitesinin korunduğu
• Hücre tabakasının canlılığını uzun süre sürdürdüğü
• Enflamasyon, pıhtı veya fibrozis oluşmadığı

rapor edilmiştir. Bununla birlikte, uzun dönem biyolojik stabilite, enfeksiyon riski ve cerrahi entegrasyon gibi konular hâlâ aktif araştırma konusudur.

İmplante edilebilir yapay böbrekler, yalnızca teknik bir cihaz değil, böbrek yetmezliği tedavisinde organ nakline alternatif bir çözüm olabilir (11). Organ bağışı azlığı ve nakil sonrası immün baskılayıcı ilaçların yan etkileri düşünüldüğünde, İBAK sistemlerinin hastalara çok daha sürdürülebilir ve risksiz bir yaşam sunabileceği öngörülmektedir. Yakın gelecekte insan denemelerinin başlaması ve cihazların uzun dönemli biyolojik güvenlik verilerinin elde edilmesiyle birlikte, İBAK sistemlerinin klinik uygulamalarda devrim yaratması beklenmektedir.

4. Malzeme Temelli Gelişmeler ve Membran Teknolojisi

Yapay böbrek teknolojilerinin başarısı yalnızca sistem tasarımına değil,

aynı zamanda kullanılan malzeme bileşenlerinin performansına da doğrudan bağlıdır. Özellikle membranlar ve adsorban materyaller, toksin uzaklaştırma, biyouyumluluk, uzun ömür ve antibakteriyel özellikler gibi birçok kritik parametrenin belirleyicisidir. Bu nedenle, son yıllarda yapay böbrek sistemlerinde kullanılan malzemeler üzerinde önemli yenilikler gerçekleştirilmiştir.

Bir yapay böbrekteki en temel bileşenlerden biri olan membran, kandan toksinlerin ve atık maddelerin seçici şekilde ayrılmasını sağlar. Bu membranlar, aynı zamanda su, elektrolit ve bazı küçük moleküllerin geçişine izin verirken; büyük proteinleri, hücreleri ve bakterileri engelleyecek şekilde tasarlanmalıdır. Bu işlevi yerine getirecek membranların hem yüksek geçirgenliğe, hem de yüksek seçiciliğe sahip olması gerekir. Ayrıca, uzun süreli kullanımda tıkanma, kirlilik ve bakteriyel birikim gibi istenmeyen etkileri minimumda tutmalıdır.

Geleneksel membranlar genellikle selüloz, polietersülfon (PES) ve poliviniliden florür (PVDF) gibi polimerlerden üretilirken; yeni nesil yapay böbrek sistemlerinde çok daha fonksiyonel, akıllı ve çok katmanlı malzemeler kullanılmaktadır. Bu gelişmeler aşağıdaki başlıklar altında toplanabilir:

A. **Karbon Bazlı Aerojeller (C-CAJ):** Karbonlaştırılmış selüloz aerojeller, oldukça düşük yoğunluklu, yüksek yüzey alanlı ve gözenekli yapılar sunar. Bu özellikleri sayesinde hem üre adsorpsiyonu için sorbent malzeme olarak, hem de filtrasyon modülünde membran destek katmanı olarak kullanılabilirler. Ayrıca karbon bazlı yapı, antibakteriyel özellik göstererek biyolojik kontaminasyonu azaltır (12).

B. **Nanofiber ve Nanokompozit Membranlar:** Elektrospin yöntemiyle üretilen nanofiber membranlar, gözenek boyutları 100 nanometrenin altında olan, çok hafif ve dayanıklı yapılardır. Bu membranlara gümüş nanoparçacık, grafen oksit, zirkonyum, hidroksiapatit gibi fonksiyonel bileşikler eklenerek; antifouling, antibakteriyel ve iyon seçici özellikler kazandırılmaktadır. Bu kompozitler sayesinde hem toksinler uzaklaştırılır, hem de protein birikimi engellenir (13).

C. **Fotokatalitik Membranlar:** Titanyum dioksit (TiO_2) gibi fotokatalitik ajanlar içeren membranlar, UV ışık altında kendini temizleme özelliği gösterir. Bu da uzun vadede membranın tıkanmasını engelleyerek cihaz ömrünü uzatır. Aynı zamanda reaktif oksijen türleri (ROS) oluşturarak bakteri ve biyofilm oluşumunu baskılar (14).

D. **Biyouyumlu ve Hücre Destekli Membranlar:** Doğal böbrek tübül yapılarını taklit eden biyouyumlu membranlar, canlı hücrelerle kaplanarak geri emilim (reabsorpsiyon) fonksiyonunu yerine getirebilir. Bu tür membranlar genellikle mikroakışkan sistemlerle birlikte çalışır ve elektrolit, glukoz, su gibi moleküllerin seçici taşınmasını sağlar (15).

Etkin bir yapay böbrek membranı için aşağıdaki kriterlerin optimize edilmesi gerekir (16):

Tablo 1.

Özellik	Açıklama
Gözenek Yapısı	Uygun molekül geçişini sağlamak için boyut, şekil ve dağılım kontrolü gereklidir.
Yüzey Hidrofilikliği	Hidrofilik yüzeyler suyu sever ve protein birikimini azaltır. Bu, daha uzun süreli ve temiz çalışmayı sağlar.
Mekanik Dayanıklılık	Uzun süreli kullanıma dayanabilmesi için elastikiyet ve kopma direnci önemlidir.
Biyouyumluluk	Kanla sürekli temas eden bu yüzeyler, pıhtı oluşumuna neden olmamalı ve bağışıklık sistemini tetiklememelidir.
Kimyasal Kararlılık	Düşük pH, yüksek iyon yoğunluğu gibi ekstrem koşullarda yapısını koruyabilmelidir.

Malzeme bilimi alanındaki bu gelişmeler, yapay böbrek sistemlerini daha kompakt, akıllı, hijyenik ve uzun ömürlü hale getirmektedir. Gelecekte, 3D yazıcılarla kişiye özel membran üretimi, yapay zeka destekli membran performans takibi ve yenilenebilir biyomalzeme kullanımı gibi yaklaşımlar sayesinde bu sistemlerin klinik uygulamaya entegrasyonu hızlanacaktır. Özellikle biyouyumlu yapılarla canlı hücreleri entegre eden hibrit membranlar, yalnızca toksin temizlemeyi değil, hormon dengesini ve su-elektrolit kontrolünü de sağlayarak böbreğin tüm işlevlerini taklit edebilecek seviyeye ulaşacaktır.

5. Otomasyon ve Akıllı Kontrol Sistemleri

Yapay böbrek sistemlerinin başarısı yalnızca toksin uzaklaştırma kapasitesiyle değil, aynı zamanda bu işlemlerin güvenli, dinamik, kullanıcıya özel ve kesintisiz biçimde gerçekleştirilmesiyle de doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle son yıllarda taşınabilir ve giyilebilir yapay böbrek prototiplerinde otomasyon, geribildirim kontrolü, sensör entegrasyonu ve akıllı yazılım destekli yönetim sistemleri büyük önem kazanmıştır.

Klasik hemodiyaliz sistemlerinde sıvı çekimi (ultrafiltrasyon), genellikle sabit debili pompalarla ayarlanır ve hastadan hastaya farklılık göstermez. Ancak bu uygulama, bazı hastalarda hipotansiyon (tansiyon düşmesi), aşırı sıvı kaybı, kas krampları, intrakraniyal basınç artışı gibi ciddi komplikasyonlara yol açabilir. Bu sorunları önlemek amacıyla geliştirilen akıllı yapay böbrek sistemlerinde, sıvı çekim hızı, toksin temizleme oranı ve elektrolit dengesi sensörlerden gelen gerçek zamanlı verilerle dinamik olarak yönetilir (17).

Akıllı kontrol sistemleri genel olarak aşağıdaki bileşenleri içerir:

1. **Sensörler:**

- Basınç sensörleri:
  Kan veya diyalizat hattındaki basınç değişimlerini ölçer.
- Akış sensörleri:
  Sıvı debisini sürekli izleyerek pompa ayarlarını kontrol eder.
- Sıcaklık sensörleri:
  Vücutla uyumlu sıcaklıkta işlem yapılmasını sağlar.
- İletkenlik sensörleri:
  Elektrolit konsantrasyonlarını izler.

2. **Mikrodenetleyici/Mikroişlemci:** Toplanan verileri işler ve kontrol algoritmaları yardımıyla sistemin davranışını gerçek zamanlı olarak ayarlar. Bu bileşen genellikle Arduino, STM32, Raspberry Pi gibi gömülü sistem platformlarıdır.

3. **Aktif Kontrol Elemanları:**

- Mini pompalar (peristaltik, diyafram vb.):
  Debi ayarı yapar.
- Valfler:
  Akış yönünü ve miktarını kontrol eder.
- LCD/ekran arayüzleri:
  Hasta veya doktorun sisteme müdahale etmesini sağlar.

4. **Geribildirim Algoritmaları:** Bu algoritmalar sayesinde cihaz, hastanın hemodinamik durumuna göre otomatik olarak sıvı çekimini artırabilir, durdurabilir veya sınırlayabilir. Bu kontrol yapısı genellikle, PID (Proportional–Integral–Derivative) kontrol; Model tabanlı tahmin algoritmaları; Lyapunov kararlılık teorisine dayalı denetleyiciler gibi matematiksel altyapılara dayanır (18).

Yeni nesil akıllı yapay böbrek sistemlerinde, makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak hastanın, geçmiş sıvı çekim profilleri, hipotansiyon riski, gündelik aktiviteleri, elektrolit dengesi değişimleri gibi veriler analiz edilerek kişiselleştirilmiş tedavi protokolleri oluşturulabilir.

Bu sayede, her hastaya özel ultrafiltrasyon oranı profili tanımlanabilir, otomatik alarm sistemleri ile erken uyarılar verilebilir, uzaktan izleme ve telemetri özellikleriyle klinik kontrol sürdürülebilir.

Akıllı sistemlerde hastayı korumaya yönelik aşağıdaki önlemler de entegre edilmektedir:

- Basınç artışında akışı durduran valfler
- Hatalı değerlerde alarm sistemleri

- Enerji kesintisine karşı batarya destekli çalışabilme
- Veri kaydı ve hata günlüğü sistemleri

Bu özellikler, cihazın yalnızca teknik olarak değil, klinik güvenlik açısından da yeterli olmasını sağlar (19).

Akıllı kontrol sistemleri, sadece yapay böbrek alanında değil; diğer taşınabilir tıbbi cihazlar (örneğin insulin pompaları, kalp destek cihazları) ile birlikte düşünüldüğünde, kişiye özel sağlık hizmetleri açısından bir paradigma değişimini temsil etmektedir. Giyilebilir yapay böbrek sistemlerine entegre edilen bu akıllı kontrol mekanizmaları sayesinde, hemodiyaliz artık klinikten bağımsız, daha güvenli ve yaşam tarzına entegre bir tedavi yöntemi hâline gelebilecektir.

6. Sonuç

Böbrek yetmezliği, hem bireysel hem de toplumsal ölçekte ciddi sağlık, yaşam kalitesi ve ekonomik sonuçlar doğuran kronik bir hastalık tablosudur. Günümüzde en yaygın tedavi yöntemi olan hemodiyaliz, yaşamı sürdürülebilir kılmakla birlikte hastaları haftada birçok kez sağlık merkezlerine bağımlı hâle getirerek fiziksel, psikolojik ve ekonomik açıdan yıpratıcı sonuçlar doğurmaktadır. Bu bağlamda, son yıllarda geliştirilen yeni nesil yapay böbrek sistemleri, yalnızca teknik açıdan değil; hasta yaşam kalitesi, sağlık sistemlerinin sürdürülebilirliği ve tedaviye erişim yönünden de devrimsel nitelikte yenilikler sunmaktadır.

Bu çalışmada incelenen taşınabilir, giyilebilir ve implante edilebilir yapay böbrek sistemleri, hem mühendislik hem de biyomedikal inovasyonların etkileyici özelliklerini yansıtmaktadır. Özellikle taşınabilir ve giyilebilir sistemlerde küçük hacimli diyalizat kullanımı, sorbent bazlı toksin uzaklaştırma, yeniden kullanılabilir sıvı döngüsü ve kompakt tasarım gibi özellikler, klasik hemodiyalize kıyasla çok daha hasta dostu çözümler ortaya koymaktadır. Bu sistemlerde kullanılan ninhidrin tabanlı polimerler, MoS_2 gibi geniş yüzey alanına sahip nano-yapılar, iyon değiştirici reçineler ve enzim destekli biyokatalizörler, üremik toksinlerin etkin şekilde tutulmasını sağlamaktadır. Ayrıca, fotokatalitik ve antibakteriyel özellik kazandırılmış nanofiber membranlar, diyaliz sırasında oluşabilecek kirlilik ve enfeksiyon riskini azaltarak sistemin ömrünü ve güvenliğini artırmaktadır.

İBAK sistemleri ise bu alandaki en ileri ve iddialı yaklaşımlardan biri olarak dikkat çekmektedir. Canlı hücre tabakalarıyla desteklenen biyo-reaktör modülleri, sadece toksinleri filtrelemekle kalmayıp, su-elektrolit dengesini ve hormon üretimini de biyolojik yollarla düzenleyerek gerçek böbrek işlevini büyük oranda taklit edebilmektedir. Vücudun kendi kan basıncıyla çalışan, dış enerji kaynağına ihtiyaç duymayan bu sistemler, hem teknik hem biyolojik yönden gerçek bir "yapay organ" tanımını karşılamaktadır. Henüz sınırlı sayıda hayvan modelinde test edilmiş olan bu sistemler, yakın gelecekte insan denemelerine geçildiğinde böbrek nakline alternatif olma potansiyeli taşımaktadır.

Tüm bu teknolojilerin başarısı, yalnızca malzeme bilimi veya sistem tasarımı ile değil; aynı zamanda otomasyon, sensör destekli kontrol, yapay zekâ ile kişiselleştirme, gerçek zamanlı izleme ve uzaktan müdahale gibi alanlarla da desteklenmektedir. Geliştirilen yapay böbrek sistemlerinin büyük çoğunluğu, hastanın hemodinamik verilerine göre sıvı çekimini ve toksin uzaklaştırma hızını ayarlayan geribildirim kontrollü algoritmalarla çalışmaktadır. Bu da, tedavinin bireye özel hâle getirilmesini ve komplikasyonların önlenmesini mümkün kılmaktadır.

Ancak tüm bu yeniliklerin yaygın klinik kullanıma geçebilmesi için bazı önemli aşamaların başarıyla tamamlanması gerekmektedir. Bunlar arasında; biyouyumluluk ve uzun dönem doku tepkisi çalışmaları, seri üretime uygunluk, sterilizasyon ve taşınabilirlik kriterlerinin karşılanması, regülasyon süreçleri ve sağlık sigorta sistemlerinin adaptasyonu yer almaktadır. Aynı zamanda maliyet etkinliği analizlerinin yapılması, düşük ve orta gelirli ülkelerde de uygulanabilir modellerin geliştirilmesi, bu teknolojilerin küresel ölçekte benimsenebilmesi için kritik öneme sahiptir.

Sonuç olarak, yapay böbrek sistemlerinde ulaşılan bu yeni nesil çözümler; hasta merkezli, mobil, akıllı, biyolojik olarak entegre ve uzun vadeli sürdürülebilir yapısıyla sadece teknik bir cihaz olmanın ötesine geçerek, çağdaş tıbbın gelecekteki yönelimlerini şekillendiren bütüncül tedavi platformları hâline gelmiştir. Her biri ayrı bir mühendislik başarısı ve biyomedikal buluş olan bu sistemler, yalnızca hastaların hayatını kolaylaştırmakla kalmayacak; aynı zamanda sağlık hizmetlerinin ev merkezli, bireyselleştirilmiş ve teknoloji destekli hâle dönüşümünde temel taşlardan biri olacaktır.

7. Kaynakça

1. Himmelfarb, J., Vanholder, R., Mehrotra, R., & Tonelli, M. (2020). *The Current and Future Landscape of Dialysis*. *Nature Public Health Emergency Collection*
2. Scribner, B. H. (1964). *The ethical problems of using artificial organs to sustain human life*. *Transactions of the American Society for Artificial Internal Organs*
3. Karakaş, A. & Yıldız, T. (2022). *Are We Ready for the Next Generation Artificial Kidney? Journal of Biomedical Science and Engineering*
4. Zhang, H. et al. (2022). *A Compact Wearable Artificial Kidney with Improved Electrolyte Balance Control*. *Nature Communications*.
5. Gokmen, M.T. et al. "Designing a Ninhydrin-Based Sorbent for Selective Urea Removal in Wearable Artificial Kidney Systems", *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023.
6. Li, Y. et al. "A Urease-Free Wearable Artificial Kidney Based on Expanded-Layer MoS_2 Nanosheets", *Nature Communications*, 2023.
7. Zhang, H. et al. "Ultralight Carbon Aerogels for Efficient Uremic Toxin Removal in Wearable Dialysis Devices", *Advanced Functional Materials*, 2022.
8. Roy, S. et al. "Engineering an Implantable Artificial Kidney", Nature Biomedical Engineering, 2022.
9. Fissell, W. H., Roy, S., Davenport, A., & Goodwin, T. J. (2021). Microelectromechanical systems (MEMS) for implantable renal devices. *Artificial Organs*, *45*(5), 502–510.
10. Deb, D., Lee, C. H., & Morizane, R. (2023). Tissue-engineered renal tubule constructs for implantable bioartificial kidney devices. *Tissue Engineering Part B: Reviews*, *29*(1), 1–15.
11. Cohen, D., Shemesh, N., & Rousso-Noori, L. (2021). Bioartificial kidney for the treatment of end-stage renal disease: Status and perspectives. *Kidney International Reports*, *6*(3), 456–467.
12. **Chen, S., Li, J., & Zhang, X.** (2022). Porous carbon aerogels for adsorption and regeneration in blood purification. *Carbon*, *190*, 256–267.
13. Wang, J. et al. "A Monophasic Hybrid Nanofiber Membrane for High-Performance Dialysis", *Journal of Membrane Science*, 2023.
14. **Wang, Y., Zhang, S., Chen, H., & Liu, Y.** (2022). *TiO_2-Modified Electrospun Nanofiber Membranes with Photocatalytic Self-Cleaning Properties for Advanced Hemodialysis Applications*. *Journal of Membrane Science*, **658**, 120728.
15. **Tang, C., Zhang, Y., Sun, S., & Zhang, X.** (2022). *Development of biofunctional membranes with renal epithelial cells for artificial kidney applications*. *Acta Biomaterialia*, **144**, 314–326.
16. **Park, J., Kim, S. Y., & Lee, S. H.** (2022). *Engineering design considerations for high-performance hemodialysis membranes: Pore structure, surface chemistry, and mechanical stability*. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, **110**(5), 1034–1046.
17. Chen, M. et al. "Integrated Biosensor-Driven Feedback Systems in Artificial Kidney Prototypes", *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2023.
18. Jansen, J. et al. "Automated Control in Wearable Dialysis Devices: A Review of Sensor-Driven Approaches", *Biomedical Engineering Reviews*, 2023.
19. **Singh, R., Kapoor, D., & Prakash, A.** (2023). *Adaptive feedback control strategies for smart wearable dialysis systems: A real-time sensor-integrated approach*. *Biomedical Signal Processing and Control*, **85**, 104851.

Bu makaleye atıfta bulunmak için:

Mammadlı, B. & Canım Ateş, S. (2026). "Yeni Nesil Yapay Böbrek Teknolojileri ve Klinik Uygulamalardaki Geleceği", *İYYÜ Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Hakemli-Akademik, 1*(1):25-28. https://doi.org/10.66125/0.2026.4