

## Su Bazlı Akıllı Polimerik Malzemeler: Hidrojeller

Pelin SARAÇOĞLU\*

\*Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyomühendislik Anabilim Dalı, İstanbul, Türkiye

### ÖZET

Hidrojeller, yüksek su içeriği ve üç boyutlu polimer ağ yapıları sayesinde biyomedikal alanda çok çeşitli uygulamalara hizmet eden benzersiz özelliklere sahiptir. Doğal veya sentetik polimerlerden üretilebilen bu malzemeler, ilaç ve hücre taşıma, doku yenileme, yara iyileşmesi, tıbbi implantların biyouyumluluğunu artırma gibi birçok işlevi yerine getirirken çevresel mühendislik gibi farklı alanlarda da kullanışlıdır. Kimyasal yapıları, çapraz bağlantıları ve üretim yöntemleriyle özelleştirilebilir, böylece akıllı malzemeler olarak farklı ihtiyaçlara uyarlanabilirler. Polimer zincirlerinin çözünmesini önleyen bu çapraz bağlar hem kimyasal hem de fiziksel yöntemlerle oluşturulabilir ve malzemeye hem elastikiyet hem de stabilite kazandırır. Bununla birlikte, hidrojellerin yüksek su içeriği onları canlı dokulara fiziksel olarak benzer kılar ve biyomedikal uygulamalar için ideal bir seçim haline getirir. Gözenekli yapıları, suyun yanı sıra biyomolekülleri ve ilaçları kapsüllemeye olanak tanır. Sulu ortamda oluşan bu malzemeler, organik çözücülere karşı dayanıklıdır ve biyolojik ajanların denatürasyon riskini en aza indirir. Hidrojellerin geri kazanılabilir ve yeniden kullanılabilir olması da onları sürdürülebilir malzeme tasarımı için de cazip hale getirmektedir. Bu derleme makalesi, hidrojellerin yapısal özelliklerini, sentez yöntemlerini ve uygulama alanlarındaki rollerine kısa bir bakış sunmakta, bu malzemelerin gelecekteki gelişimlerine dair önemli bilgiler sunmayı amaçlamaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** *Polimerik jeller, Hidrojeller, Çapraz Bağlama*

### ABSTRACT

Hydrogels, with their high water content and three-dimensional polymer network structures, possess unique properties that serve a wide range of applications in the biomedical field. These materials, which can be produced from natural or synthetic polymers, perform various functions such as drug and cell delivery, tissue regeneration, wound healing, and enhancing the biocompatibility of medical implants, while also being useful in fields like environmental engineering. Their chemical structures, crosslinking, and production methods can be tailored, allowing them to be adapted as smart materials for different needs. The crosslinks, which prevent the dissolution of polymer chains, can be created through both chemical and physical methods, providing the material with elasticity and stability. Moreover, the high water content of hydrogels makes them physically similar to living tissues, rendering them an ideal choice for biomedical applications. Their porous structure enables encapsulation of water, biomolecules, and drugs. Formed in

aqueous environments, these materials exhibit resistance to organic solvents and minimize the risk of denaturation of biological agents. Additionally, the recyclability and reusability of hydrogels make them attractive for sustainable material design. This review article provides a concise overview of the structural properties, synthesis methods, and biomedical roles of hydrogels, aiming to offer key insights into their future development.

**Keywords:** Polymeric Gels, Hydrogels, Crosslinking

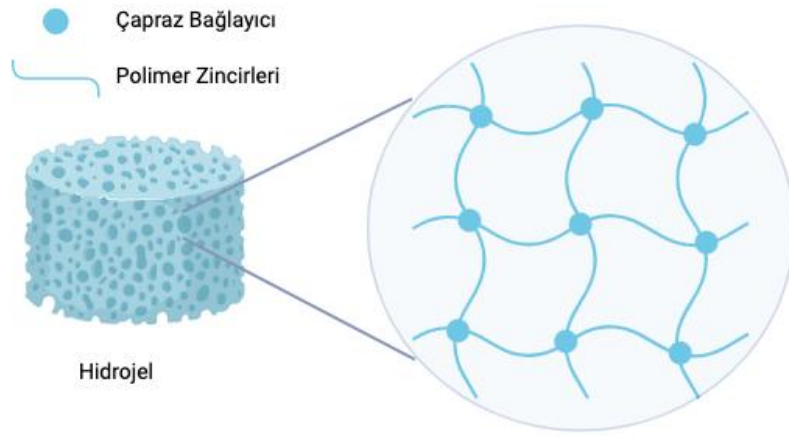
## GİRİŞ

Polimer malzemeler, sahip oldukları esneklik, dayanıklılık ve uyarlanabilirlik sayesinde modern teknolojilerin temel bileşenleri arasında yer almaktadır. Günümüzde, bu malzemelerin gelişen versiyonları olan akıllı polimerler ve akıllı jeller, çevresel veya biyolojik uyarılara yanıt verme yetenekleriyle dikkat çekmektedir. Akıllı polimerler, sıcaklık, pH, ışık, elektrik veya manyetik alan gibi uyarılara tepki olarak fiziksel veya kimyasal özelliklerini değiştirebilme yeteneğine sahiptir. Benzer şekilde, akıllı jeller de bu uyarılara bağlı olarak hacimsel değişimler gösterebilir ve biyomedikal uygulamalardan çevre koruma teknolojilerine kadar geniş bir kullanım alanı bulmaktadır (Kumar ve Kumar, 2018).

Polimerik jeller, sıvı ve katı arasında bir ara yapıya sahip, çok yönlü çapraz bağlı makromoleküler ağlardır. Üç boyutlu çapraz bağlı polimer ağları, su veya biyolojik sıvılar gibi çözücülerini emebilme kapasitesi ile dikkat çekerken, fiziksel (sıcaklık, ışık, basınç) ve kimyasal uyarılara (pH, iyonik güç) yanıt vererek hacimlerini geri dönüşümlü şekilde değiştirebilirler. Böyle bir polimerik ağ, sıvı moleküllerle dolduğunda şişmiş bir yapı oluşturmakta ve bu sıvı su olduğunda polimerik jel, hidrojel olarak adlandırılmaktadır (Chelu M. ve Musuc AM, 2023). Bu makale, hidrojellerin temel özelliklerini, mevcut uygulama alanlarını ve gelecekteki potansiyel yeniliklerini ele alarak, bu gelişen malzeme sınıfının önemine dair kısa bir bakış sunmaktadır.

## HİDROJELLER

Hidrojel adı verilen hidrofilik jeller, büyük miktarda suyu içine alıp çözünmeden tutabilen üç boyutlu çapraz bağlı polimer ağlarıdır (Şekil 1). Su veya biyolojik sıvı tutma özelliği, dokulara fiziksel benzerlik sağlamakta ve hidrofilik ilaçları kolayca kapsülleme yeteneği vermektedir (Akhtar vd., 2016). Sıvı tutabilme kapasitesinin yüksek olması, bu polimerlerin yapısındaki –OH, –CONH–, –CONH<sub>2</sub>– ve –SO<sub>3</sub>H gibi hidrofilik fonksiyonel grupların varlığındandır ve yine bunun bir sonucu olarak esnek ve yumuşak olabilmektedirler (Gholamali, 2021; J. Li ve Mooney, 2016). Hidrojeller genellikle biyoyumlu, çevre dostu ve biyolojik olarak parçalanabilen malzemeler olarak kabul edilmektedir. Şişmiş olan polimer ağları oldukça ilgi çekicidir ve protein ayırma malzemeleri, yara iyileşmesi, göz içi lensler, doku mühendisliği ve ilaçların kontrollü salımı için birçok biyoteknolojik alanda geniş uygulama alanına sahiptir (Ho; vd., 2022).



**Şekil 1.** Hidrojellerin şematik gösterimi.

Hidrojeller köken, bileşim, iyonik yük, fiziksel yapı ve çapraz bağlanma temelinde farklı şekillerde sınıflandırılmaktadır. Kökenlerine göre hidrojeller doğal, sentetik veya doğal polimerlerin sentetik polimerlerle birleştirilmesiyle hibrit olarak hazırlanabilmektedir. Ağların fiziksel yapılarına göre, hidrojeller amorf, yarı kristal veya kristal olabilmektedir. Bir polimer ağında bulunan iyonik yükler açısından incelendiğinde anyonik, katyonik, nötr ve amfolitik hidrojeller olarak sınıflandırılmaktadır. Ek olarak, temelde polimerlerin çapraz bağlama ağları ile oluşturulduğundan, çapraz bağlamaya dayalı olarak fiziksel ve kimyasal olarak çapraz bağlı; boyutuna göre ise makrojel, mikrojel ve nanojel olarak sentezlenebilmektedir (Mahinroosta vd., 2018; Rezakhani vd., 2024; Sharma ve Tiwari, 2020).

İdeal bir hidrojel, çözücüde yüksek absorpsiyon kapasitesi, gözenekli yapı, toksik olmama, dayanıklılık ve yük altında yüksek miktarda çözücü absorplama gibi özelliklere sahip olmalıdır (Rezakhani vd., 2024). Çapraz bağlama prosedürleri ve malzemelerinin kombinasyonu, biyomedikal uygulamalar da ideal hidrojel sistemleri elde etmek için en etkili yöntemlerden biri olarak görünmektedir (Vasile vd., 2020). Ayrıca, hidrojeller, varoluşlarındaki en önemli özellik olan şişme özelliğine sahiptir. Hidrojellerin şişmesi üç adımda gerçekleşir: (i) suyun hidrojel ağına difüzyonu, (ii) polimer zincirlerinin gevşemesi, ardından (iii) hidrojel ağının genişlemesi (Bashir vd., 2020). Hidrojel yapısı ve şişme davranışı büyük ölçüde polimer bileşimine, çapraz bağlamanın doğasına, üretim yöntemlerine ve dış çevre koşullarına bağlıdır. Bu faktörler, jel özelliklerini geniş bir aralıkta mükemmel bir şekilde ayarlanabilir hale getirmektedir (Ho vd., 2022; H. Li ve Silberschmidt, 2022). Hidrojellerin sentezi için kolayca bulunabilen çok çeşitli hazırlama teknikleri ve başlangıç malzemeleri, bu polimerik malzemelerin çok çeşitli uygulamalarda kullanılmasını sağlamaktadır.

***Hidrojellerin Sentez Yöntemleri***

Son yıllarda, hidrojellerin tasarımı ve sentezi için kolay, hızlı ve verimli stratejilerin geliştirilmesine büyük ilgi gösterilmiştir. Hidrojeller, suya duyarlı yapıları ve biyolojik uyumlulukları nedeniyle, çeşitli fonksiyonel özelliklere sahip olacak şekilde tasarlanabilirler. Hidrojel sentezinde kullanılan yöntemler ve malzeme seçimleri, bu özelliklerin elde edilmesinde belirleyici faktörlerdir (Liu & Chen, 2024). Birçok doğal polimer malzeme (sodyum aljinat, kitosan, nişasta ve selüloz, vb.) içerdiği çok sayıda karboksil ve amino grubu sayesinde çapraz bağlı hidrojellerin hazırlanmasında kullanılmaktadır. Buna ek olarak, bazı sentetik polimer malzemeler (polivinil alkol (PVA), poli (laktik asit) (PLA), polidopamin, vb.) de büyük hidroksil grupları nedeniyle çapraz bağlı hidrojellerin sentezinde tercih edilmektedir (Zhang vd., 2022).

Sentetik veya doğal polimerlere dayalı hidrojel ağları, çapraz bağlı yapılarına göre temel olarak fiziksel veya kimyasal bağlanma, polimerizasyon aşılama ve radyasyon çapraz bağlama olmak üzere farklı şekillerde sentezlenebilmektedir. Çapraz bağlama, polimer zincirlerinin büyümesiyle aynı anda veya polimer zincirlerinin sentezinden sonra gerçekleşebilir. Bu nedenle, hidrojellerin hazırlanması monomerlerden, prepolimerlerden veya polimerlerden başlayabilmektedir (Kaith vd., 2021; Madduma-Bandarage & Madihally, 2021).

Fiziksel veya geri dönüşümlü jeller, nispeten kolay üretimleri nedeniyle birçok araştırmacının ilgi odağı haline gelmiştir. Literatürde fiziksel olarak çapraz bağlı hidrojelleri üretmek için polimer çözeltisinin ısıtılması veya soğutulması, iyonik etkileşimler, kompleks koaservasyon hidrojen bağları, ısıdan kaynaklanan olgunlaşma veya agregasyon ve donma-çözülme döngüler gibi yöntemler bildirilmiştir. Bu sistemler, hidrojen bağları, hidrofobik veya iyonik etkileşimler gibi polimer zincirleri arasındaki nispeten zayıf etkileşimlerle oluşmaktadır (Mahinroosta vd., 2018). Polimer zincirlerinin hidroksil grupları arasında hidrojen etkileşimleri bulunur ve bu etkileşimler, hidrojel oluşturmak için suyla hidrojen bağı geliştirilmesinden sorumludur. Daha yüksek polimer konsantrasyonu, daha fazla hidrojen bağı oluşumuna yol açarak daha düzenli ve kararlı bir jel elde edilmesini sağlar (Rizwan vd., 2021). Oluşan fiziksel hidrojeller, polimer zincirleri arasındaki bu ikincil etkileşimler çok güçlü olmadığından çevresel değişikliklere geri dönüşümlü bir yanıt gösterir. Dış uyaranlara maruz kaldıklarında düzensiz, kırılabilir ve mekanik olarak zayıf olma eğilimindedirler (Kaith vd., 2021).

Kimyasal olarak çapraz bağlanmış jeller, küçük moleküller olan çapraz bağlayıcıları (formaldehit, glutaraldehit GA, genipin, diglisidil eter ve N, N'-metilenbisakrilamid) kullanarak çeşitli yollarla meydana gelir. Yoğuşma reaksiyonu veya serbest radikal mekanizması yöntemleriyle ağı stabilize etmek için dahil olan mekanizma, çapraz bağlayıcıların polimerlerle kovalent bağlar oluşturmasıyla gerçekleşir (Bashir vd., 2020). Çapraz bağlanma reaksiyonunu başlatmak için,

reaksiyon karışımına polimerle birlikte düşük molekül ağırlıklı bir çapraz bağlama maddesi eklemek gerekir. Çapraz bağlayıcıların yokluğunda, hidrofilik doğrusal polimer zincirleri, polimer zincirleri ve suyun termodinamik uyumluluğu nedeniyle suda çözünür. Bununla birlikte, çapraz bağlayıcıların varlığında, çözünürlük, ağdaki çapraz bağlayıcıların elastikiyetinin geri çekme kuvveti tarafından dengelenir. Bu kuvvetler eşit olduğunda, şişme bir dengeye ulaşır. Ağın hidrofilikliği,  $-NH_2$ ,  $-COOH$ ,  $-OH$ ,  $-CONH_2$ ,  $-CONH-$  ve  $-SO_3H$  gibi hidrofilik grupların varlığı, kılcal etkiler ve ozmotik basınç ile ilişkilidir. Kimyasal ve fiziksel çapraz bağlayıcıları, şişmiş halde hidrojellerin üç boyutlu yapısını korumaktadır (Ullah vd., 2015). Bununla birlikte, fiziksel çapraz bağlama yöntemleri ile sentezlenen jellerin mekanik özellikleri zayıf fiziksel etkileşim nedeniyle, kimyasal hidrojellerden daha yumuşak, zayıf ve kırılabilir olma eğilimindedir (Ho vd., 2022; Mahinroosta vd., 2018).

Hidrojel üretiminde kullanılan yenilikçi ve etkili bir teknik olan polimerizasyon aşılama yöntemi, bir polimerin yüzeyine veya omurgasına hidrofobik ya da hidrofilik monomerlerin bağlanarak üç boyutlu, yüksek su tutma kapasiteli yapılar oluşturmasıyla hazırlanır (Bashir vd., 2020). Aşılama işlemi, hidrojin mekanik ve fiziksel özelliklerini ayarlamaya olanak tanır. Aynı zamanda, antibakteriyel veya iletken özellikler kazanmasını sağlayabilir (Palem vd., 2020).

Radyasyonla hidrojel sentezi, polimerlerin çapraz bağlanması için yüksek enerjili radyasyon kullanılarak gerçekleştirilen bir diğer yöntemdir. Bu yöntem, polimerik malzemelerin fiziksel ve kimyasal özelliklerini değiştirmek ve hidrojel elde etmek amacıyla uygulanır. İyonlaştırıcı radyasyon türleri (örneğin, gama ışınları, elektron ışınları veya X-ışınları) kullanılarak yapılır. Kimyasal çapraz bağlama maddelerine ihtiyaç duyulmaması, böylece toksisiteyi azaltması en büyük avantajlarından biridir. (Estrada Villegas vd., 2018).

Sonuç olarak, hidrojellerin sentezi, bu malzemelerin suya duyarlı ve biyolojik uyumlu özelliklerinin kontrol edilmesinde temel bir rol oynar. Sentez sürecindeki kullanılan monomer türleri, çapraz bağlama yöntemleri ve polimerizasyon teknikleri, hidrojin son kullanıcıya uygun fonksiyonel özelliklere sahip olmasını sağlar.

### ***Hidrojellerin Şişme ve Bozunma Mekanizmaları***

Hidrojeller, su alarak şişme özelliği gösterir ve şişme davranışı, polimer ağının suyu emme yeteneğiyle doğrudan ilişkilidir. Hidrojin iç yapısındaki çapraz bağlar, su moleküllerini emerek polimer ağının genişlemesine yol açar (Wang vd., 2024). Bu süreç ozmotik basınç ile polimer-çözücü etkileşimlerine dayanır. Polielektrolit hidrojellerde, iyonların oluşturduğu ek ozmotik basınç ve benzer elektrik yüklerinin itici etkisi şişmeyi artırır. Polimerlerin moleküler yapısı ve çapraz bağ yoğunluğu, şişme hızını belirleyen ana faktörlerdir (Mo vd., 2022). Hidrojellerdeki çapraz bağlama yoğunluğu arttıkça, şişme kapasitesi azalır. Çünkü daha yoğun çapraz bağlar, polimer ağının

genişlemesini sınırlayarak daha az suyun emilmesine izin verir. Ancak, çapraz bağlama yoğunluğu düşük olduğunda, polimer ağı daha esnek olur ve daha fazla suyu absorbe edebilir (Feng ve Wang, 2023).

Hidrojellerin bozunma özelliği, biyomedikal uygulamalarda önemli bir parametredir. Bu özellik, hidrojellerin çevresel koşullara veya biyolojik ortamda enzimlerin etkisiyle ne kadar sürede bozulduğunu belirler. Hidrojelin bozunma süresi, polimerin kimyasal yapısına, çevresel koşullara, çapraz bağ yoğunluğuna ve biyolojik etmenlere bağlı olarak değişebilir (Grosjean vd., 2023). Hidrojellerin bozunma mekanizmaları, yapısındaki bağların kopma şekline göre yüzey erozyonu veya toplu bozunma olarak sınıflandırılır. Yüzey erozyonu dış tabakalarda gerçekleşirken, toplu bozunma tüm jel boyunca eşit olarak meydana gelir. Çapraz bağlayıcı miktarı hem ağ yoğunluğunu hem de bozunabilir bağların sayısını artırarak bozunma oranını etkiler. Polimer zincirlerinin hacmi ve hidrofobik özellikleri de bu süreci etkiler (Hosseinzadeh ve Ahmadi, 2023).

Hidrojellerin bozunma özellikleri, özellikle ilaç taşıma sistemleri, yara örtüleri, doku mühendisliği ve çevresel temizlik gibi alanlarda kritik bir rol oynar. Örneğin, kontrollü ilaç salımı uygulamalarında, hidrojelin belirli bir süre sonra bozulması ve içerdiği ilacın serbest bırakılması istenir. Bu, polimerin bozunma hızını kontrol ederek sağlanabilir (Caló ve Khutoryanskiy, 2015). Yoğun çapraz bağlama hem bozunmayı hem de ilaç salımını yavaşlatır. Su geçirgenliği yüksek olan hidrojellerde, toplu bozunma ilaç salımı için daha hızlı bir mekanizma sunarken, yüzey erozyonu daha kontrollü ve yavaş salım sağlar (McBath ve Shipp, 2010). Hidrojellerin şişme ve parçalanma özellikleri, bu materyallerin temel karakteristiklerinden olup, özellikle biyomedikal, farmasötik ve çevresel uygulamalarda önemli rol oynar.

## **UYARAN DUYARLI HİDROJELLER**

Uyaran duyarlı hidrojeller, dış ortamdan gelen fiziksel, kimyasal veya biyolojik uyarılara duyarlı olarak şekil, hacim veya fonksiyonel yapılarını değiştirebilen özel polimerik malzemelerdir. Bu uyarılar arasında sıcaklık, pH, iyonik kuvvet, elektrik alanı, manyetik alan, ışık ve biyolojik moleküller yer almaktadır. Çevresel uyarılara yanıt verirler ve büyüme davranışlarında, ağ yapısında, mekanik mukavemette ve geçirgenlikte beklenmedik değişiklikler yaşarlar, bu nedenle çevreye duyarlı akıllı hidrojeller olarak adlandırılırlar (Bustamante-Torres vd., 2021; Ullah vd., 2015). Akıllı hidrojellerin özellikleri, giderek daha fazla hidrojel geliştirilmesine katkı sağlamış ve akıllı hidrojeller daha sonra ilaç dağıtımı, biyoayırma, biyosensör ve doku mühendisliği gibi farklı biyolojik bilim alanlarında geniş bir yelpazede kullanım alanı bulmuştur.

### ***Sıcaklık Duyarlı Hidrojeller***

Uyarılara duyarlı hidrojellerin uyarılara verdiği yanıt, polimer yapılarında meydana gelen fiziksel ve kimyasal değişikliklere dayanmaktadır. Sıcaklığa duyarlı hidrojeller, sıcaklık değişimlerine bağlı olarak şişme davranışı sergileyen suyla dolu polimer ağlarıdır. Bu malzemeler, sıcaklık arttığında şişme (pozitif tepki) ya da büzülme (negatif tepki) göstermektedir. Isıya duyarlı polimerler, yapılarında hem hidrofilik hem de hidrofobik bölümler barındırır. Sıcaklık değiştiğinde, polimerdeki bu bölümler arasındaki etkileşimler değişir, bu da çapraz bağlı ağın çözünürlüğünü etkiler ve sol-jel faz geçişine yol açar (Bustamante-Torres vd., 2021). Bu özellikleri, sıcaklığa duyarlı hidrojellerin hem teknolojik hem de endüstriyel uygulamalarda önemli bir malzeme haline gelmesini sağlamaktadır.

### ***pH Duyarlı Hidrojeller***

pH duyarlı hidrojeller, çevredeki pH değişimlerine tepki veren akıllı malzemelerdir. Yapılarında asidik veya bazik gruplar bulunur. Bu gruplar, çevredeki pH seviyesine bağlı olarak protonlanır veya deprotonlanır. Polimer ağındaki grupların iyonize olması, hidrojel içinde elektrostatik itme veya çekme kuvvetleri oluşturur. Bu kuvvetler, polimer ağının şişmesine veya büzülmesine neden olur (Zhuo vd., 2020). Bu özellikleri sayesinde ilaç salınımı, biyosensörler ve çevresel kontrollü sistemler gibi uygulamalarda kullanılmaktadırlar.

### ***Manyetik Duyarlı Hidrojeller***

Yaygın olarak kullanılan bu uyarıya duyarlı hidrojeller arasında, manyetik duyarlı hidrojeller, manyetik alanlara tepki verebilen özel polimer ağlarından oluşan malzemelerdir. Bu hidrojeller, diğer uyarıya duyarlı hidrojellerin aksine, manyetik özelliklere sahip katkı maddelerinin (örneğin, manyetik nanoparçacıklar) hidrojel ağlarına entegre edilmesiyle geliştirilir (Z. Li vd., 2021). Yapılarında bulunan manyetik nanoparçacıklar sayesinde dışarıdan uygulanan manyetik alanlara tepki verir ve hidrojelin şişme veya büzülme gibi fiziksel özelliklerini değiştirebilirler. Manyetik alanlar, bu parçacıkları manipüle ederek hidrojellerin hacmini, şeklini veya yapısını değiştirmekte etkilidir. Bu etkileşim, hidrojellerin dış manyetik uyarılara duyarlı olmasını sağlar (Xue ve Sun, 2022).

### ***Işık Duyarlı Hidrojeller***

Işığa duyarlı hidrojeller, ışık tarafından aktive edilen ve çevresel değişikliklere tepki veren polimer ağlarıdır. Bu hidrojeller, UV ışığına duyarlı ve görünür ışığa duyarlı olmak üzere iki ana gruba ayrılır. UV ışığına duyarlı hidrojeller, ultraviyole ışığı altında şişme sağlayan moleküller içermektedir. Görünür ışığa duyarlı hidrojellerde ise jel, ışığın etkisiyle sıcaklık artışı yaşar ve bu da şişmeye yol açar; tıpkı sıcaklığa duyarlı hidrojeller gibi bu sıcaklık değişimine yanıt verir. Işığa

### *Su Bazlı Akıllı Polimerik Malzemeler: Hidrojeller*

duyarlı hidrojellerin işleyişi üç ana mekanizmaya dayanır: i) Işık, ısıya dönüştürülür ve sıcaklık değişimi jelin şişmesine neden olur. ii) Işığa maruz kalma, foto-duyarlı moleküllerin iyonlaşmasını sağlar ve bu da ozmotik basınç farkına yol açarak jelin genişlemesine neden olur. iii) Işığa duyarlı kromoforik grupların dahil edilmesiyle, ışık etkileşimi polimer zincirinde yapısal değişikliklere neden olur, bu da jelin fiziksel ve kimyasal özelliklerini değiştirir. Bu mekanizmalar, ışığa duyarlı hidrojellerin çeşitli biyomedikal ve endüstriyel uygulamalarda kullanılmasını sağlar (Andrade vd., 2021; Mahinroosta vd., 2018).

### *Elektrik Alan Duyarlı Hidrojeller*

Elektro-duyarlı hidrojeller, elektrik alanına tepki olarak şişme veya büzülme gösteren polielektrolit bazlı malzemelerdir. Elektrik alanı altında, hidrojelin anot ve katot bölgelerinde yerel bükülmeler oluşur; bu davranış, hidrojelin yapısı, elektrik alanının gücü ve uygulama süresiyle şekillenir. Böylelikle, biyoyumlu ve elektro-duyarlı akıllı cihazlar olarak kullanılabilirler. Bu hidrojellerin avantajları arasında ses azaltma, kimyasal ayırma ve kontrollü ilaç salımı yer alır. Ayrıca, biyosensörler, işlevsel doku mühendisliği iskeleleri ve implantlarda önemli bir rol oynar. 3D baskı teknolojisiyle birleştirilerek gelecekteki biyomedikal uygulamalar için büyük potansiyel taşırlar (Mahmood vd., 2022).

## **HİDROJELLERİN UYGULAMA ALANLARI**

Hidrojeller, üstün su tutma kapasiteleri, biyoyumlulukları ve çevresel uyaranlara duyarlılıkları sayesinde birçok alanda geniş bir uygulama yelpazesi sunar. Biyomedikal ve sağlık uygulamaları, hidrojellerin en önemli kullanım alanlarından biridir. Kontrollü ve hedefe yönelik ilaç dağıtımı sağlayan hidrojeller, özellikle çevresel uyaranlara duyarlılıkları sayesinde belirli bölgelerde etkili ilaç salınımı yapabilir. Ayrıca, yüksek nem tutma kapasiteleriyle yara örtülerinde kullanılarak iyileşme sürecini hızlandırır ve enfeksiyon riskini azaltır. Hücre büyümesi ve farklılaşmasını destekleyen hidrojeller, doku mühendisliğinde iskele malzemesi olarak işlev görür (Kesharwani vd., 2021). Biyosensörler ve diagnostik cihazlarda çevresel veya biyokimyasal değişikliklere hassasiyetle yanıt veren hidrojeller, hassas ölçümler yapılmasını sağlar. Bunun yanında, yapay organlar, kontakt lensler ve yapay kıkırdak gibi medikal ürünlerde de kullanımı oldukça yaygındır (Awasthi vd., 2022; Ma vd., 2021).

Çevre ve su arıtımı, hidrojellerin bir diğer önemli uygulama alanıdır. Ağır metal ve kirleticilerin giderilmesi, hidrojellerin iyon değişimi veya adsorpsiyon özellikleriyle mümkün hale gelir (Jayakumar vd., 2020). Tarımda ise toprak nemini tutmak, gözenekliliğini artırmak ve yavaş salımlı gübrelere bitki büyümesini desteklemek için kullanılmaktadır (Kaur vd., 2023). Diğer yandan, gıda endüstrisinde de gıda kirleticilerini tespit etmek için, katkı maddelerinin kontrollü salımını sağlayarak tatlandırıcılar, vitaminler, probiyotikler ve koruyucular gibi bileşenlerin etkili



kullanımına olanak tanır (M. Li vd., 2022). Ayrıca, biyolojik olarak parçalanabilir filmler ve kaplamalar ile gıda ambalajlarında da yer alır.

Yumuşak robotik ve mekanik uygulamalar, hidrojellerin çevresel uyaranlara verdiği mekanik tepkilerin değerlendirildiği bir diğer alandır. Elektro-duyarlı hidrojeller, mekanik enerji üretmek için elektrik alanına tepki vererek doku mühendisliğinde yapay kaslar ve aktüatörler gibi yumuşak robotik sistemlerde kullanılmaktadır (Yaralı vd., 2022). Enerji ve elektronik alanında, esnek ve iletken hidrojeller, giyilebilir sensörler ve enerji depolama cihazlarında işlev görmek üzere tasarlanmıştır (M. Li vd., 2022).

Kozmetik ve kişisel bakım ürünlerinde hidrojeller, cilt bakım maskeleri ve nemlendirici ürünlerde yaygın olarak yer alır (Mitura vd., 2020). İlaçlı yamalar ve bandajlarda da kullanılan bu malzemeler, cilt üzerinde etkili ilaç salınımı sağlar. 3D baskı teknolojisi ve akıllı malzemeler alanında ise hidrojeller, biyoink olarak hücre içeren doku ve organ modellerinin yazdırılmasında kullanılmaktadır (Ramiah vd., 2020). Çevresel uyaranlara yanıt veren akıllı hidrojeller, çeşitli modern cihazların geliştirilmesinde önemli bir bileşen olarak öne çıkar.

Hidrojellerin esnekliği, uyarlanabilirliği ve biyouyumluluğu, onları modern bilim ve teknolojinin birçok alanında vazgeçilmez bir malzeme haline getirmiştir. Kontrollü ilaç salınımından çevresel koruma çözümlerine, yumuşak robotikten kozmetik ürünlere kadar birçok farklı sektörde önemli uygulamalar sunmaktadır. Bu özellikleri, hidrojelleri gelecekte daha da yaygın bir şekilde kullanılacak olan ileri malzemelerden biri yapmaktadır.

## **SONUÇ VE GELECEK PERSPEKTİFLERİ**

Hidrojeller, biyomedikal uygulamalardan çevresel ve endüstriyel kullanımlara kadar sundukları eşsiz özelliklerle geniş bir potansiyele sahiptir. Yüksek su içeriği, biyouyumluluk ve çevresel uyaranlara yanıt verme yetenekleri, bu malzemeleri ilaç taşıma, doku mühendisliği, yara iyileşmesi ve tıbbi implantlar gibi kritik biyomedikal alanlarda ideal bir seçenek haline getirmektedir. Ayrıca, hidrojellerin hassas sensörler, su arıtma sistemleri ve tarımda kontrollü su salınımı gibi çevresel ve endüstriyel uygulamalarda kullanımı da dikkat çekmektedir. Çapraz bağlı polimer ağ yapıları, hidrojellerin hem fiziksel hem de biyolojik süreçlere uyum sağlamalarını sağlayarak, bu malzemelerin terapötik ve çevresel uygulamalarda güvenli ve etkili kullanılmalarını mümkün kılmaktadır.

Gelecekte, hidrojellerin biyomedikal ve çevresel alandaki uygulamaları daha da genişleyecektir. Yeni sentez yöntemleri ve akıllı hidrojel tasarımları, ilaç salımı ve hücre mühendisliği gibi alanlarda daha hedeflenmiş ve kontrollü tedavi seçenekleri sunma potansiyeline sahiptir. Aynı zamanda, manyetik, ışıksal ve elektriksel uyaranlara duyarlı hidrojeller, sensör teknolojileri, aktüatörler ve çevresel izleme sistemlerinde yenilikçi çözümler sunacaktır. Özellikle, tedavi

süreçlerinin daha kişiselleştirilmesi ve etkili hale getirilmesi adına, hidrojel bazlı biyomalzemelerin nanoteknoloji ve biyomühendislik ile entegrasyonu büyük bir yenilik fırsatı yaratmaktadır. Çevre dostu hidrojel tasarımları ise su kaynaklarının korunması ve kirleticilerin giderilmesi gibi sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sağlayacaktır.

Sonuç olarak, hidrojellerin biyomedikal, çevresel ve endüstriyel alandaki çok yönlü kullanım potansiyeli, bu malzemelerin gelecekte sağlık ve çevre alanlarında devrim yaratabilecek gücünü ortaya koymaktadır. Bu alandaki araştırmaların ilerlemesi, hidrojellerin terapötik, çevresel ve teknolojik uygulamalarını daha da geliştirecek ve hem sağlık hem de çevre için daha etkili, sürdürülebilir çözümler sunacaktır.

## REFERANSLAR

- Akhtar, M. F., Hanif, M., & Ranjha, N. M. (2016). Methods of synthesis of hydrogels ... A review. *Saudi Pharmaceutical Journal*, 24(5), 554-559. <https://doi.org/10.1016/j.jsps.2015.03.022>
- Andrade, F., Roca-Melendres, M. M., Durán-Lara, E. F., Rafael, D., & Schwartz, S. (2021). Stimuli-Responsive Hydrogels for Cancer Treatment: The Role of pH, Light, Ionic Strength and Magnetic Field. *Cancers*, 13(5), 1164. <https://doi.org/10.3390/cancers13051164>
- Awasthi, S., Gaur, J. K., Bobji, M. S., & Srivastava, C. (2022). Nanoparticle-reinforced polyacrylamide hydrogel composites for clinical applications: A review. *Journal of Materials Science*, 57(17), 8041-8063. <https://doi.org/10.1007/s10853-022-07146-3>
- Bashir, S., Hina, M., Iqbal, J., Rajpar, A. H., Mujtaba, M. A., Alghamdi, N. A., Wageh, S., Ramesh, K., & Ramesh, S. (2020a). Fundamental Concepts of Hydrogels: Synthesis, Properties, and Their Applications. *Polymers*, 12(11), 2702. <https://doi.org/10.3390/polym12112702>
- Bashir, S., Hina, M., Iqbal, J., Rajpar, A. H., Mujtaba, M. A., Alghamdi, N. A., Wageh, S., Ramesh, K., & Ramesh, S. (2020b). Fundamental Concepts of Hydrogels: Synthesis, Properties, and Their Applications. *Polymers*, 12(11), 2702. <https://doi.org/10.3390/polym12112702>
- Bustamante-Torres, M., Romero-Fierro, D., Arcentales-Vera, B., Palomino, K., Magaña, H., & Bucio, E. (2021). Hydrogels Classification According to the Physical or Chemical Interactions and as Stimuli-Sensitive Materials. *Gels*, 7(4), 182. <https://doi.org/10.3390/gels7040182>
- Caló, E., & Khutoryanskiy, V. V. (2015). Biomedical applications of hydrogels: A review of patents and commercial products. *European Polymer Journal*, 65, 252-267. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2014.11.024>
- Chelu, M., & Musuc, A. M. (2023). Polymer Gels: Classification and Recent Developments in Biomedical Applications. *Gels*, 9(2), 161. <https://doi.org/10.3390/gels9020161>
- Estrada Villegas, G. M., Morselli, G. R., González-Pérez, G., & Lugão, A. B. (2018). Enhancement — swelling properties of PVGA hydrogel by alternative radiation crosslinking route. *Radiation*

- 
- Physics and Chemistry, 153, 44-50. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2018.08.038>
- Feng, W., & Wang, Z. (2023). Tailoring the Swelling-Shrinkable Behavior of Hydrogels for Biomedical Applications. *Advanced Science*, 10(28), 2303326. <https://doi.org/10.1002/advs.202303326>
- Gholamali, I. (2021). Stimuli-Responsive Polysaccharide Hydrogels for Biomedical Applications: A Review. *Regenerative Engineering and Translational Medicine*, 7(1), 91-114. <https://doi.org/10.1007/s40883-019-00134-1>
- Grosjean, M., Gangolphe, L., & Nottelet, B. (2023). Degradable Self-healable Networks for Use in Biomedical Applications. *Advanced Functional Materials*, 33(13), 2205315. <https://doi.org/10.1002/adfm.202205315>
- Ho, T. C., Chang, C. C., Chan, H. P., Chung, T. W., Shu, C. W., Chuang, K. P., Duh, T. H., Yang, M. H., & Tyan, Y. C. (2022). Hydrogels: Properties and Applications in Biomedicine. *Molecules*, 27(9), 1-29. <https://doi.org/10.3390/molecules27092902>
- Ho, T.-C., Chang, C.-C., Chan, H.-P., Chung, T.-W., Shu, C.-W., Chuang, K.-P., Duh, T.-H., Yang, M.-H., & Tyan, Y.-C. (2022). Hydrogels: Properties and Applications in Biomedicine. *Molecules*, 27(9), 2902. <https://doi.org/10.3390/molecules27092902>
- Hosseinzadeh, B., & Ahmadi, M. (2023). Degradable hydrogels: Design mechanisms and versatile applications. *Materials Today Sustainability*, 23, 100468. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2023.100468>
- Jayakumar, A., Jose, V. K., & Lee, J. (2020). Hydrogels for Medical and Environmental Applications. *Small Methods*, 4(3), 1900735. <https://doi.org/10.1002/smt.201900735>
- Kaith, B. S., Singh, A., Sharma, A. K., & Sud, D. (2021). Hydrogels: Synthesis, Classification, Properties and Potential Applications—A Brief Review. *Journal of Polymers and the Environment*, 29(12), 3827-3841. <https://doi.org/10.1007/s10924-021-02184-5>
- Kaur, P., Agrawal, R., Pfeffer, F. M., Williams, R., & Bohidar, H. B. (2023). Hydrogels in Agriculture: Prospects and Challenges. *Journal of Polymers and the Environment*, 31(9), 3701-3718. <https://doi.org/10.1007/s10924-023-02859-1>
- Kesharwani, P., Bisht, A., Alexander, A., Dave, V., & Sharma, S. (2021). Biomedical applications of hydrogels in drug delivery system: An update. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 66, 102914. <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2021.102914>
- Kumar, A., & Kumar, A. (2018). Antimicrobial polymeric gels. *Çinde Polymeric Gels* (ss. 357-371). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102179-8.00014-4>
- Li, H., & Silberschmidt, V. V. (Ed.). (2022). *The mechanics of hydrogels: Mechanical properties, testing, and applications*. Woodhead Publishing, an imprint of Elsevier.
- Li, J., & Mooney, D. J. (2016). Designing hydrogels for controlled drug delivery. *Nature Reviews Materials*, 1(12), 16071. <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2016.71>
- Li, M., He, X., Zhao, R., Shi, Q., Nian, Y., & Hu, B. (2022). Hydrogels as promising carriers for
-

- the delivery of food bioactive ingredients. *Frontiers in Nutrition*, 9, 1006520. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1006520>
- Li, Z., Li, Y., Chen, C., & Cheng, Y. (2021). Magnetic-responsive hydrogels: From strategic design to biomedical applications. *Journal of Controlled Release*, 335, 541-556. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2021.06.003>
- Liu, B., & Chen, K. (2024). Advances in Hydrogel-Based Drug Delivery Systems. *Gels*, 10(4), 262. <https://doi.org/10.3390/gels10040262>
- Ma, X., Ahadian, S., Liu, S., Zhang, J., Liu, S., Cao, T., Lin, W., Wu, D., De Barros, N. R., Zare, M. R., Diltemiz, S. E., Jucaud, V., Zhu, Y., Zhang, S., Banton, E., Gu, Y., Nan, K., Xu, S., Dokmeci, M. R., & Khademhosseini, A. (2021). Smart Contact Lenses for Biosensing Applications. *Advanced Intelligent Systems*, 3(5), 2000263. <https://doi.org/10.1002/aisy.202000263>
- Madduma-Bandarage, U. S. K., & Madihally, S. V. (2021). Synthetic hydrogels: Synthesis, novel trends, and applications. *Journal of Applied Polymer Science*, 138(19), 50376. <https://doi.org/10.1002/app.50376>
- Mahinroosta, M., Jomeh Farsangi, Z., Allahverdi, A., & Shakoori, Z. (2018). Hydrogels as intelligent materials: A brief review of synthesis, properties and applications. *Materials Today Chemistry*, 8, 42-55. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2018.02.004>
- Mahmood, A., Patel, D., Hickson, B., DesRochers, J., & Hu, X. (2022). Recent Progress in Biopolymer-Based Hydrogel Materials for Biomedical Applications. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(3), 1415. <https://doi.org/10.3390/ijms23031415>
- McBath, R. A., & Shipp, D. A. (2010). Swelling and degradation of hydrogels synthesized with degradable poly( $\beta$ -amino ester) crosslinkers. *Polymer Chemistry*, 1(6), 860. <https://doi.org/10.1039/c0py00074d>
- Mitura, S., Sionkowska, A., & Jaiswal, A. (2020). Biopolymers for hydrogels in cosmetics: Review. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 31(6), 50. <https://doi.org/10.1007/s10856-020-06390-w>
- Mo, C., Luo, R., & Chen, Y. (2022). Advances in the Stimuli-Responsive Injectable Hydrogel for Controlled Release of Drugs. *Macromolecular Rapid Communications*, 43(10), 2200007. <https://doi.org/10.1002/marc.202200007>
- Palem, R. R., Shimoga, G., Rao, K. S. V. K., Lee, S.-H., & Kang, T. J. (2020). Guar gum graft polymer-based silver nanocomposite hydrogels: Synthesis, characterization and its biomedical applications. *Journal of Polymer Research*, 27(3), 68. <https://doi.org/10.1007/s10965-020-2026-8>
- Ramiah, P., Du Toit, L. C., Choonara, Y. E., Kondiah, P. P. D., & Pillay, V. (2020). Hydrogel-Based Biopinks for 3D Bioprinting in Tissue Regeneration. *Frontiers in Materials*, 7, 76. <https://doi.org/10.3389/fmats.2020.00076>

- Rezakhani, L., Gharibshahian, M., Salehi, M., Zamani, S., Abpeikar, Z., Ghaderzadeh, O., Alizadeh, M., Masoudi, A., Rezaei, N., & Cheraghali, D. (2024). Recent advances in hydrogels applications for tissue engineering and clinical trials. *Regenerative Therapy*, 26, 635-645. <https://doi.org/10.1016/j.reth.2024.08.015>
- Rizwan, M., Rubina Gilani, S., Iqbal Durani, A., & Naseem, S. (2021). Materials diversity of hydrogel: Synthesis, polymerization process and soil conditioning properties in agricultural field. *Journal of Advanced Research*, 33, 15-40. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2021.03.007>
- Sharma, S., & Tiwari, S. (2020). RETRACTED: A review on biomacromolecular hydrogel classification and its applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 162, 737-747. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.06.110>
- Ullah, F., Othman, M. B. H., Javed, F., Ahmad, Z., & Akil, H. Md. (2015). Classification, processing and application of hydrogels: A review. *Materials Science and Engineering: C*, 57, 414-433. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2015.07.053>
- Vasile, C., Pamfil, D., Stoleru, E., & Baican, M. (2020). New Developments in Medical Applications of Hybrid Hydrogels Containing Natural Polymers. *Molecules*, 25(7), 1539. <https://doi.org/10.3390/molecules25071539>
- Wang, R., Cheng, C., Wang, H., & Wang, D. (2024). Swollen hydrogel nanotechnology: Advanced applications of the rudimentary swelling properties of hydrogels. *ChemPhysMater*, 3(4), 357-375. <https://doi.org/10.1016/j.chphma.2024.07.006>
- Xue, L., & Sun, J. (2022). Magnetic hydrogels with ordered structure for biomedical applications. *Frontiers in Chemistry*, 10, 1040492. <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.1040492>
- Yarali, E., Baniasadi, M., Zolfagharian, A., Chavoshi, M., Arefi, F., Hossain, M., Bastola, A., Ansari, M., Foyouzat, A., Dabbagh, A., Ebrahimi, M., Mirzaali, M. J., & Bodaghi, M. (2022). Magneto-/ electro-responsive polymers toward manufacturing, characterization, and biomedical/ soft robotic applications. *Applied Materials Today*, 26, 101306. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2021.101306>
- Zhang, Z., Fu, H., Li, Z., Huang, J., Xu, Z., Lai, Y., Qian, X., & Zhang, S. (2022). Hydrogel materials for sustainable water resources harvesting & treatment: Synthesis, mechanism and applications. *Chemical Engineering Journal*, 439, 135756. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.135756>
- Zhuo, S., Zhang, F., Yu, J., Zhang, X., Yang, G., & Liu, X. (2020). pH-Sensitive Biomaterials for Drug Delivery. *Molecules*, 25(23), 5649. <https://doi.org/10.3390/molecules25235649>