

Hydrogel-based Composites: A Review

Abolfazl Maghsoodnia

Chemical and Petroleum Engineering Department, Sharif University of Technology,
P.O. Box: 11365-8639, Tehran, Iran

Received: 22 January 2016, Accepted: 17 June 2016

Abstract

Hydrogels are water-saturated polymeric networks with many different structures which are used in different applications such as: biomedical, pharmacy and biosensors and separation of biomolecules and cells. In recent years, hydrogels, because of their stable and flexible structure, have received attention in mass transfer technology. Temperature-, pressure-, pH- and electric field-responsive hydrogels are novel control systems in microfluidic applications. The transport phenomena have been greatly improved by this emerging new hydrogel-based composite technology. In this respect, this composite is used to enhance mass transport in hydrogels by forming a colloidal environment, which is useful in an application such as tissue engineering. As a new type of hydrogel-based composite, emulsion-filled gels are water-saturated polymers doped with oil droplets. These materials have major advantages in drug delivery systems and food science applications. The characteristics of these new gels are being studied in order to discover their new applications extended to other physic-chemical fields.

Key Words

hydrogel,
transport phenomena,
hydrogel-based composite,
emulsion-filled gel,
responsive hydrogel

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: a.maghsoodnia@gmail.com

بسیارش

فصلنامه علمی-ترویجی

سال ششم، شماره ۴

صفحه ۹۴-۱۰۲، ۱۳۹۵

ISSN: 2252-0449

مروری بر کامپوزیت‌های بر پایه هیدروژل

ابوالفضل مقصودنیا

تهران، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، صندوق پستی ۱۱۳۶۵-۸۶۳۹

دریافت: ۱۳۹۴/۱۱/۲، پذیرش: ۱۳۹۵/۳/۲۸

هیدروژل‌ها، شبکه‌های پلیمری اشباع از آب هستند که به دلیل تنوع ساختار در زمینه‌های گوناگون مانند مصارف پزشکی، داروسازی، جداسازی مولکول‌های زیستی یا سلول‌ها و زیست‌حسگرها استفاده می‌شوند. در سال‌های اخیر، به دلیل داشتن ساختار پایدار و انعطاف‌پذیر در پدیده‌های انتقال، به هیدروژل‌ها توجه بسیار شده است. هیدروژل‌های پاسخگو به تغییر عوامل محیطی، مانند دما، فشار، pH و میدان الکتریکی جایگزین نوینی برای سامانه‌های کنترل در سامانه‌های میکروسیالی محسوب می‌شوند. با ظهور کامپوزیت‌های بر پایه هیدروژل، بستری نوین برای بهبود پدیده انتقال فراهم شد. در نتیجه، این کامپوزیت‌ها با هدف بهبود فرایندهای انتقال جرم با استفاده از ایجاد محیط کلوییدی در هیدروژل‌ها به کار برده شده‌اند. این سامانه‌ها به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد، در کاربردهای بسیاری مانند مهندسی بافت استفاده می‌شوند. ژل‌های پر شده امولسیون به عنوان گونه جدیدی از کامپوزیت‌های بر پایه هیدروژل، پلیمرهای اشباع از آبی هستند که با پراکندن قطره‌ها در فاز آلی به وجود می‌آیند. این دسته جدید از مواد، کاربردهای بسیاری در دارورسانی و صنایع غذایی به دست آورده‌اند و خواص آن‌ها به منظور یافتن سایر کاربردهای نوین در دست مطالعه است.

چکیده



ابوالفضل مقصودنیا

واژگان کلیدی

هیدروژل،
پدیده‌های انتقال،
کامپوزیت بر پایه هیدروژل،
ژل پر شده امولسیونی،
هیدروژل پاسخگو

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

a.magsoudnia@gmail.com

مقدمه

هیدروژل‌ها شبکه‌های پلیمری هستند که قابلیت جذب آب زیادی را در ساختار شبکه‌ای داشته و شکل پذیرند. این مواد با برخورداری از حالت نیمه جامد، در زمان از دست دادن آب منقبض می‌شوند. هیدروژل‌ها کاربردهای فراوانی در دارورسانی، مهندسی بافت و فرایندهای جداسازی دارند [۱].

در دهه‌های اخیر، مطالعات بسیاری در زمینه استفاده از کامپوزیت‌های بر پایه هیدروژل در کاربردهای انتقال جرم، انجام یافته است. انتقال جرم بهبود یافته در اثر جریان الکترواسمزی به وجود آمده که به وسیله ذرات کلوییدی تعبیه شده در ژل برای بهبود عملکرد زیست‌حسگرها مطالعه شده است [۲،۳]. افزون بر این، تلاش شده است تا از جریان ایجاد شده در قطره‌ها در کاربردهای انتقالی استفاده شود. از روش‌های پی‌بردن به رفتار اختلاط در قطره‌ها، استفاده از جریان الکترواسمز در ژل، زمانی که قطره‌ای در شبکه آن به دام افتاده است. این قطره به تنهایی نیز می‌تواند به عنوان میکروراکتور و میکروجداساز برای کاربردهای آزمایشگاه روی تراشه (lab-on-a-chip) به کار رود. در میکروکانال دارای کامپوزیت‌های هیدروژل-قطره، استفاده از این قطره‌ها به منظور جداسازی و انجام واکنش در سامانه‌های میکروسیالی امکان‌پذیر است [۴].

افزون بر این، به تازگی تلاش‌های فراوانی انجام گرفته است تا دسته جدید و بسیار کاربردی از مواد با نام ژل‌های پر شده امولسیون (emulsion-filled gels) در کاربردهای دارورسانی و صنایع غذایی استفاده شوند [۵،۶]. این ژل‌ها در حقیقت، کامپوزیت‌های هیدروژل-قطره‌ای هستند که از پراکندن قطره‌ها در ژل‌های اشباع شده از آب ایجاد می‌شوند. این مواد در دارورسانی به عنوان محیط انتقال دارو عمل می‌کنند. به ژل‌های پر شده امولسیونی نسبت به امولسیون‌های آب-روغن توجه بیشتری شده است. این موضوع به دلیل برخورداری ژل‌ها از مزایایی نظیر بهبود خواص مکانیکی، افزایش پایداری امولسیون در محیط ژل و قابلیت حمل داروهای آبدوست است [۷].

کاربرد دیگر ژل‌های پر شده امولسیونی، به کارگیری در واکنش‌های شیمیایی و فرایندهای جداسازی در مقیاس‌های ماکرو و میکروست. در این حالت، قطره به عنوان میکروراکتور و میکروجداساز در نظر گرفته می‌شود [۸].

مطالعات آزمایشگاهی اهمیت برهم‌کنش میان قطره و ژل را بر خواص ژل‌های پر شده امولسیونی آشکار کرده است. این برهم‌کنش به ویژگی‌های سطحی قطره‌ها بستگی دارد. در نتیجه، قطره‌ها از

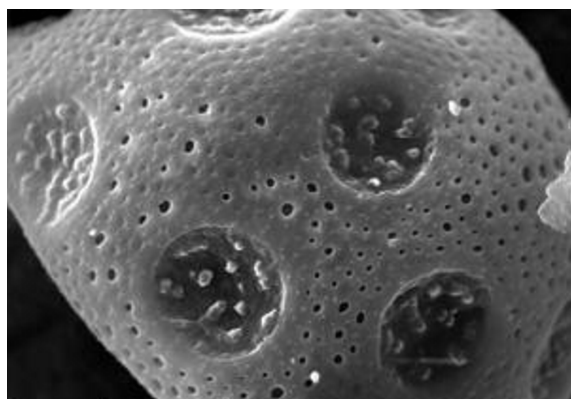
نظر تقابل با ژل به دو دسته مقید (bound) و غیرمقید (unbound) تقسیم می‌شوند. بسته به جاذبه فیزیکی و شیمیایی میان قطره و ژل، قطره می‌تواند به پیوند با ژل تمایل داشته یا از آن گریزان باشد [۹،۶].

در دهه اخیر، از میکرورنولوژی الکتریکی به عنوان روشی نوین در تعیین خواص سطحی سامانه کلویید-ژل استفاده شده است. در این روش از پاسخ الکتریکی ذرات در هیدروژل زیر تحریک میدان الکتریکی استفاده می‌شود. جابه‌جایی کوچک قطره‌ها، در مقیاس آنگستروم، به تشخیص خواص مرزی ذره-هیدروژل منجر می‌شود. به تازگی، از این روش در مطالعاتی برای پی‌بردن به خواص مرز قطره-هیدروژل نیز استفاده شده است [۱۰،۴].

هیدروژل

هیدروژل، به شبکه‌های پلیمری کشسان اشباع از آب گفته می‌شود. این شبکه‌های سه‌بعدی، آبدوست و دارای اتصالات عرضی هستند که در تماس با آب متورم شده، اما حل نمی‌شوند. هیدروژل‌ها می‌توانند دارای شکل‌های فیزیکی مختلف، شامل ورقه، میکروذره، نانوذره، ساختار پوششی و فیلم باشند. به دلیل این تنوع ساختاری، هیدروژل‌ها در زمینه‌های گوناگون پژوهشی مانند زیست‌حسگرها، مهندسی بافت، جداسازی مولکول‌های زیستی یا سلول‌ها و تنظیم زیست‌چسبندگی مواد استفاده می‌شوند [۱۱،۱۲]. در شکل‌های ۱ و ۲ نمونه‌هایی از ساختار هیدروژل نشان داده شده است. ژل، بسته به ماهیت محیط آبی و ساختار پلیمر، با نسبت‌های مختلف آبدار می‌شود. بدین معنی که هر چه تعداد گروه‌های آبدوست ژل بیشتر باشد، قابلیت نگهداری آب در آن نیز افزایش می‌یابد. این مقدار از ۱۰٪ تا چند برابر وزن ساختار پلیمر متغیر است. اثر آب‌پذیری هیدروژل‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است.

محتوای آبی هیدروژل‌ها نقش مهمی در تعیین ویژگی‌های کلی



شکل ۱- تصویر SEM از شبکه پلیمری هیدروژل [۱].

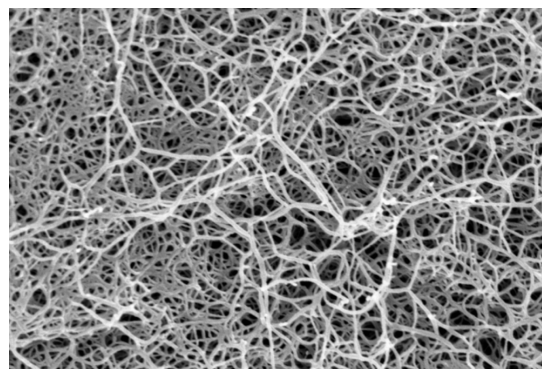
تغییر شکل زیادی دارد. خواص آن به برهم‌کنش دو جزء سازنده آن، یعنی آب و ساختار پلیمری بستگی دارد. آب از تبدیل هیدروژل به جامد سخت و شبکه پلیمری از سیال شدن آن جلوگیری می‌کند. در نتیجه هیدروژل، بسته به ترکیب شیمیایی، از سیالی گرانرو تا جامدی سخت متغیر است.

هیدروژل‌ها بر اساس منشأ پلیمر به دو دسته هیدروژل‌های طبیعی، مانند کلاژن و پلی‌ساکارید و هیدروژل‌های ترکیبی مانند پلی‌آکریل‌امید و اتیلن گلیکول تفکیک می‌شوند. امروزه، هیدروژل‌های ترکیبی به دلیل جذب آب و طول عمر زیادتر و وجود منابع خام گسترده، از کاربرد بیشتری برخوردارند [۱۳].

هیدروژل‌ها را بر اساس ساختار شبکه می‌توان در دو دسته قرار داد. اگر شبکه شامل پیوندهای کووالانس باشد، آن‌ها را هیدروژل‌های دائمی می‌نامند که از نمونه‌های آن می‌توان به پلی‌هیدروکسی‌اتیل متاکریلات (PHEMA) و پلی‌متیل متاکریلات (PMMA) اشاره کرد. اگر شبکه نتیجه برهم‌کنش فیزیکی بوده یا به عبارتی شبکه شامل پیوندهای مولکولی، یونی یا هیدروژنی باشد، به آن‌ها هیدروژل‌های فیزیکی گفته می‌شود. از نمونه‌های آن‌ها می‌توان پلی‌وینیل الکل-گلیسین و ژلاتین را نام برد [۱۳].

هیدروژل‌ها را بر اساس پاسخ به محیط خارجی می‌توان به دو گروه معمولی و پاسخگو به محرک دسته‌بندی کرد. هیدروژل‌های معمولی هنگام قرارگیری در محیط آبی، آب جذب می‌کنند و با تغییر pH و دمای محیط یا اعمال میدان الکتریکی تغییری در مقدار جذب آب آن‌ها ایجاد نمی‌شود. در مقابل، دسته دوم به تحریک‌های یاد شده واکنش نشان می‌دهند و مقدار جذب آب آن‌ها تغییر می‌کند [۱۴].

هیدروژل‌ها، به دلیل خواص ترکیبی مشابه با بافت زیستی طبیعی در زیست‌مواد کاربردهای گسترده، به‌ویژه در مهندسی بافت، دارند. در حقیقت، هیدروژل به سبب قابلیت جذب زیاد آب، سازگاری بیشتری با شرایط زیستی بدن دارد. این ماده در مقایسه با جامدهای پلیمری، گزینه مناسب‌تری نیز برای جایگزینی بافت طبیعی به شمار می‌رود. بدین منظور، می‌توان از هیدروژل‌های طبیعی یا ترکیبی استفاده کرد که هر یک دارای مزایا و معایبی هستند. گونه طبیعی هیدروژل، مانند ژلاتین و کلاژن، به دلیل خاصیت زیست‌فعالی ذاتی و در نتیجه ایجاد شرایط بهتر برای رشد سلول‌ها، نسبت به گونه ترکیبی از مزایایی برخوردار است. اما وجود مشکلاتی در خالص‌سازی هیدروژل‌های طبیعی، استفاده از آن‌ها را با محدودیت روبه‌رو می‌کند. از سوی دیگر، هیدروژل‌های ترکیبی می‌توانند با ساختاری همگن‌تر ساخته شوند. اما به دلیل فعال نبودن در شرایط

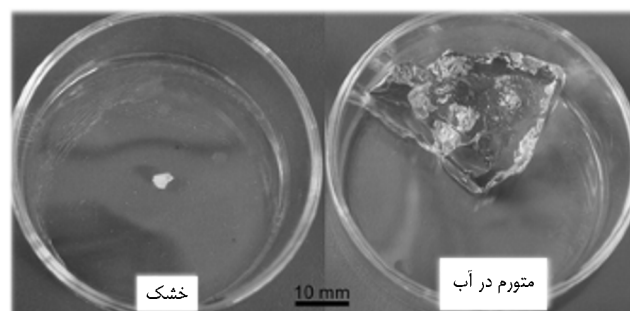


شکل ۲- ساختار هیدروژل متخلخل [۱۱].

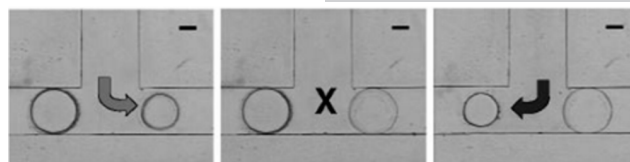
شبکه پلیمری ایفا می‌کند. بر این اساس، هیدروژل‌های آبدوست در مقایسه با شبکه‌های پلیمری آبگریز، ویژگی‌های متمایزی نشان می‌دهند. شرایط تهیه هیدروژل‌ها نیز به شکل درخور توجهی ملازم‌تر است. بدین معنی که افزون بر تشکیل ژل در دمای محیط، به‌ندرت از حلال‌های آلی در فرایند تولید آن‌ها استفاده می‌شود. هیدروژل‌ها، به‌ویژه انواع به‌کار رفته در دارورسانی و اهداف زیست‌پزشکی، باید زیست‌سازگاری و زیست‌تخریب‌پذیری مناسب داشته باشند.

ساختار شبکه هیدروژل‌ها می‌تواند درشت‌متخلخل، ریزمتخلخل یا غیرمتخلخل باشد. هیدروژل‌های درشت‌متخلخل منافذ بزرگی در ابعاد $0.1 \mu\text{m}$ تا $1 \mu\text{m}$ دارند. این هیدروژل‌ها داروی به‌دام افتاده درون خلل و فرج خود را با کمک سازوکار وابسته به ضریب پخش دارو آزاد می‌کنند. هیدروژل‌های ریزمتخلخل منافذ کوچکی در محدوده 100 nm تا 10 nm دارند و داروی داخل آن‌ها با فرایندهای انتشار و جریان همرفت مولکولی آزاد می‌شود. هیدروژل‌های غیرمتخلخل ساختارهای غریبالمانند در ابعاد درشت‌مولکول محسوب می‌شوند که منافذ آن‌ها 10 nm تا 1 nm است و از راه ایجاد اتصالات عرضی در زنجیرهای مونومر تشکیل می‌شوند. در این ساختارها آزادسازی دارو تنها با استفاده از سازوکار انتشار انجام می‌شود [۱۳].

ساختار هیدروژل به‌گونه‌ای است که در اثر اعمال نیرو، قابلیت



شکل ۳- جذب آب به‌وسیله هیدروژل [۱۲].



شکل ۴- استفاده از هیدروژل‌های پاسخگو به عوامل محیطی در کنترل جریان سامانه‌های میکروسیالی [۱۸].

زیستی، ممکن است نتواند شرایط لازم را برای رشد سلول‌ها ایجاد کند [۱۱].

همان‌طور که گفته شد، بخش درخور توجهی از هیدروژل‌ها را آب تشکیل می‌دهد. از خاصیت برگشت‌پذیری هیدروژل که با ازدست‌دادن آب منقبض و با جذب دوباره آن منبسط می‌شود، در کاربردهای بسیاری می‌توان بهره برد. در این راستا، استفاده از هیدروژل‌های پاسخگو به عوامل مختلف، در کنترل جریان خودتنظیم سامانه‌های میکروسکوپی، امکان‌پذیر است [۱۷-۱۵]. شکل ۴ نمایی از تحریک‌پذیری هیدروژل‌های پاسخگو را نشان می‌دهد. برای نمونه، Beebe و همکاران سامانه‌ای را طراحی کردند که در آن هیدروژل‌های پاسخگو به pH پشت‌غشایی تعبیه شده بود. آن‌ها موفق شدند، با تغییر pH که موجب انبساط و انقباض (تغییر ابعاد) هیدروژل‌ها می‌شد به غشا فشار وارد کرده و جریان سیال را کنترل کنند [۱۸]. مزیت این روش در بی‌نیاز شدن از منبع انرژی خارجی است. همچنین، این روش مشکلات یک‌پارچه‌سازی قطعات در مقیاس میکرومتر را ندارد.

کامپوزیت‌های هیدروژل-قطره

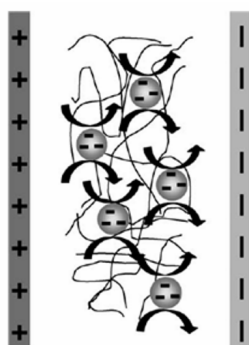
به‌منظور بهبود انتقال جرم در کاربردهای مختلف، پژوهش‌های بسیاری روی کامپوزیت‌های بر پایه هیدروژل انجام یافته است. برای مثال، این فرایند در زیست‌حسگری مطالعه شده است که جریان الکترواسمز در آن ناشی از ذرات کلوییدی تعبیه شده است [۳، ۱۹]. زیست‌حسگر نوعی حسگر است که برای تشخیص نمونه‌های مختلف کاربرد دارد و از جزء زیستی و آشکارساز فیزیکی-شیمیایی تشکیل شده است. در این حسگرها از زیست‌ماده‌ای استفاده می‌شود که به‌طور گزینشی و تنها با ماده خاصی واکنش می‌دهد. از زیست‌حسگرها معمولاً برای تشخیص زیست‌مولکول‌های مختلف، مانند آنزیم‌ها، پادتن‌ها، نوکلئیدها و پروتئین‌ها، استفاده می‌شود. گونه زیست‌حسگرهای بر پایه هیدروژل به‌تازگی مورد توجه قرار گرفته‌اند. سرعت پاسخگویی زیست‌حسگرهای بر پایه هیدروژل به سرعت انتقال جرم نمونه در ژل و زیست‌مولکول‌های سنسجش‌گر واکنش بستگی دارد. استفاده

از ژل، میان نمونه و زیست‌مولکول‌های سنسجش‌گر واکنش، محیط خالی به‌وجود می‌آورد که نمونه باید در این مسیر منتقل شود. این انتقال اگر تنها به‌روش نفوذ مولکولی انجام شود، در سرعت پاسخ‌دهی محدودیت ایجاد می‌کند. بنابراین، نکته مهم درباره این دسته از زیست‌حسگرها، افزایش انتقال جرم به‌روشی سریع‌تر از نفوذ مولکولی است. بدین منظور، پیشنهاد شده است، برای ایجاد جریان الکترواسمز از تعبیه کردن ذرات باردار در ژل و تحریک آن‌ها به‌وسیله اعمال میدان الکتریکی استفاده شود.

در این راستا، Matos و همکاران نانوذرات سیلیکا را در ژل پلی‌آکریل‌آمید تعبیه کرده و در آن میدان الکتریکی برقرار کردند. بدین ترتیب آن‌ها با ایجاد جریان الکترواسمز، شار انتقال نمونه را که به سازوکار نفوذ مولکولی محدود بود، ارتقا داده و سرعت پاسخ‌دهی را بهبود بخشیدند [۱۹]. شکل ۵ جریان الکترواسمز کلوییدهای سیلیکای دارای بارهای منفی را در شبکه متخلخل ژل نشان می‌دهد. بارهای مخالف مجاور این ذرات، با برقراری میدان الکتریکی شروع به حرکت می‌کنند. همچنین، به‌کاربردن نیروی بازدارنده بر مولکول‌های سیال، این مولکول‌ها را نیز وادار به حرکت می‌کند.

بهبود خواص هیدروژل با کمک جادادن ذرات ریز کلوییدی مختلف، به زیست‌حسگرها محدود نیست و در زمینه‌های گسترده بررسی شده است. برای مثال، Serksen و همکاران نانوذرات طلا یا سیلیکای پوشش یافته با طلا را در هیدروژل حساس به دما جاگذاری کردند. بدین ترتیب، آن‌ها توانستند با ایجاد تورم حساس به نور در هیدروژل، از آن در کنترل جریان نوری در میکروسیال استفاده کنند [۲۰].

به‌عنوان گونه‌ای نوین از کامپوزیت‌های بر پایه ژل، به ژل‌های پرشده امولسیون توجه بسیار شده است. این ژل‌ها در حقیقت، کامپوزیت‌های هیدروژل-قطره هستند که در اثر پراکندن قطره‌ها در



شکل ۵- حرکت الکترواسمز ذرات کلوییدی سیلیکا در اثر برقراردادن میدان الکتریکی [۱۹].

معنی که باتوجه به جاذبه فیزیکی و شیمیایی میان قطره و ژل، قطره می‌تواند به پیوند با ژل تمایل داشته باشد (مقید) یا از پیوند با آن گریزان باشد (غیرمقید).

Chen و Dickinson خواص گرانشی و کشسانی ژل‌های پر شده امولسیون از جنس پروتئین آب پنیر (whey protein) را در شرایط قطره‌های مقید و غیرمقید به ژل در تغییر شکل‌های اندک و زیاد با استفاده از رنومتر کنترلی بررسی کردند (شکل ۶). این کار، بر اساس تغییرات غلظت پروتئین، کسر حجمی قطره‌ها و اندازه آن‌ها انجام شد. در نهایت مشاهده شد، قطره‌های مقید باعث افزایش استحکام ژل می‌شوند، در حالی که، قطره‌های غیرمقید استحکام ژل را کاهش می‌دهند. همچنین آن‌ها دریافتند، هرچه مدول کشسانی ژل بیشتر باشد، اثر قطره‌های پیوندی کمتر مشاهده می‌شود، اما اثر قطره‌های غیرپیوندی افزایش می‌یابد. کسر حجمی بیشتر قطره‌ها و کاهش اندازه آن‌ها این آثار را تشدید می‌کند [۲۲].

McClements و همکاران اثر اندازه قطره‌ها و نوع ماده امولسیون‌کننده را بر رئولوژی پروتئین آب پنیر بررسی کردند. آن‌ها دریافتند، کاهش اندازه قطره‌ها موجب افزایش استحکام ژل می‌شود. همچنین آن‌ها ثابت کردند، قطره‌های پوشانده شده با امولسیون‌کننده‌هایی که قابلیت ترکیب شدن با شبکه ژل را دارند، ساختار ژل را تقویت کرده و استحکام آن را بهبود می‌بخشند. در مقابل، قطره‌های پوشانده شده با امولسیون‌کننده‌هایی که نمی‌توانند با ساختار ژل ترکیب شوند، سبب کاهش استحکام ژل می‌شوند [۲۳]. همچنین، خواص شکست ژل با ایجاد امولسیون قطره‌ها در ژل و باتوجه به برهم‌کنش آن‌ها و شبکه ژل دست‌خوش تغییر می‌شود. در این راستا نیز مطالعات بسیاری انجام شده است. برای نمونه Sala و همکاران خواص تغییر شکل بزرگ در سه نوع شبکه ژل مختلف با قطره‌های مقید و غیرمقید را به شکل تابعی از سرعت فشرده‌سازی مطالعه و اثر برهم‌کنش قطره و ژل را بر خواص شکست این ژل‌ها بررسی کردند [۶، ۹، ۲۴].

در مطالعه‌ای دیگر، Chojnicka و همکاران اثر برهم‌کنش قطره روغن و ژل را بر خواص روان‌سازی ژل بررسی کردند. برای ژل‌های دارای قطره‌های تشکیل‌دهنده پیوند با ژل، ضریب اصطکاک ژل با افزایش غلظت قطره‌ها به تدریج افزایش می‌یابد. برای ژل‌های دارای قطره‌های غیرپیوندی، ضریب اصطکاک ژل کمتر از ژل مشابه بدون امولسیون است، اما تغییر غلظت امولسیون موجب تغییر درخوردگی در آن نمی‌شود [۲۵].

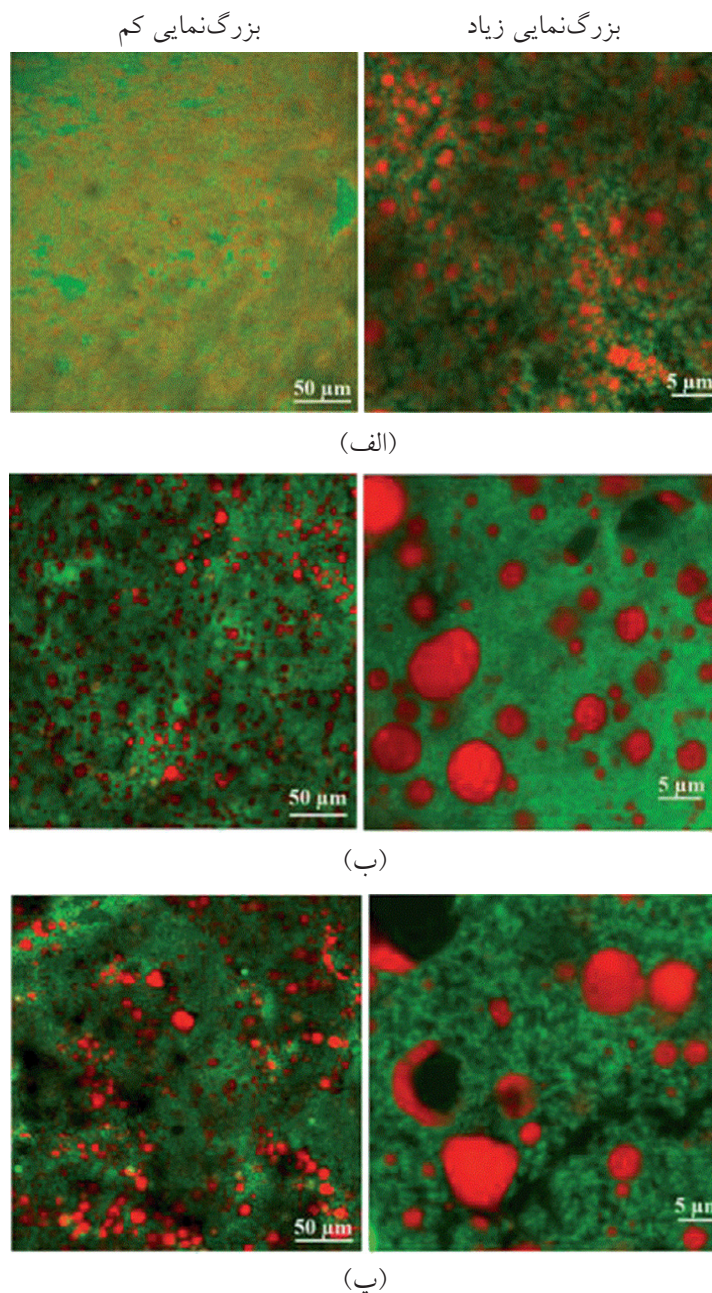
در تعدادی از مطالعات، مدول کشسانی ژل‌های دارای امولسیون به عنوان تابعی از کسر حجمی قطره‌ها و برهم‌کنش آن‌ها با ژل

ژل‌های اشباع از آب به وجود می‌آیند. این نوع از کامپوزیت‌های بر پایه هیدروژل، دسته جدیدی از مواد را تشکیل داده‌اند که در دارورسانی و صنایع غذایی و آرایشی کاربردهای بسیاری یافته‌اند. بسیاری از مواد غذایی مانند ماست، پنیر، سوسیس و ژلاتین را می‌توان در دسته ژل‌های پر شده امولسیونی قرار داد.

همان‌طور که بیان شد، از کاربردهای بسیار ژل‌های پر شده امولسیونی در دارورسانی است. بدین منظور، داروی مدنظر با فرایند کپسول‌دار کردن در قطره‌های روغنی امتزاج‌ناپذیر با آب قرار می‌گیرند. در مرحله بعد، می‌توان دارو را نیز به روش‌های مختلف با انتقال فاز روغنی منتقل کرد. مزیت این روش دارورسانی، امکان رهایش کنترل شده دارو و مقاومت مکانیکی سامانه به منظور کنترل بهتر داروست. در این مواد کنترل و مشخصه‌سازی سامانه قطره و ژل به خواص مکانیکی و روان‌کاری ژل‌های پر شده امولسیونی نیاز دارد. بدین ترتیب، اهمیت برهم‌کنش ژل و قطره مشخص می‌شود. در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های بسیاری به منظور غلبه بر مشکل انحلال‌ناپذیری داروهای حلال در چربی اتفاق افتاده است. در این راه، امولسیون‌های قطره‌های چربی در آب از برجسته‌ترین راه‌حل‌ها بوده است. فواید استفاده از این کار در سامانه دارورسانی عبارت از کاهش سمیت دارو، محافظت از ترکیبات واکنش‌پذیر در برابر آبکافت و اکسایش و آسان‌بودن نسبی آماده‌سازی فرمول‌بندی داروست. همچنین، به تازگی هیدروژل‌های پر شده امولسیونی مورد توجه قرار گرفته‌اند. این مواد، افزون بر فواید گفته شده برای امولسیون‌های چربی در آب، موجب بهبود مقاومت مکانیکی برای جابه‌جایی آسان‌تر شده و فرصتی را نیز برای انتقال داروهای آبدوست فراهم می‌کنند [۷].

از کاربردهای برجسته ژل‌های پر شده امولسیونی، به کارگیری آن‌ها در مقیاس ماکرو و میکرو در واکنش‌های شیمیایی و فرایندهای جداسازی است. در این فرایندها، قطره نقش میکروراکتور و میکروجداساز را دارد. بدین منظور، ژل‌ها به شکل فازی همگن در نظر گرفته می‌شوند که خواص آن‌ها از هیدروژل و قطره متفاوت است. طراحی دستگاه‌هایی که از این مواد استفاده می‌کنند، باید به گونه‌ای باشد که قابلیت پیش‌بینی اثر خواص ژل و قطره بر خواص مؤثر ژل وجود داشته باشد [۸].

اثر قطره‌ها بر خواص رئولوژی ژل به غلظت و خواص رئولوژی قطره‌ها و برهم‌کنش قطره و ژل بستگی دارد [۲۱]. مطالعات آزمایشگاهی بسیاری اهمیت برهم‌کنش قطره و ژل را بر خواص مکانیکی و رئولوژی ژل‌های پر شده امولسیونی آشکار کرده‌اند. قطره‌ها از نظر برهم‌کنش با ژل به دو دسته تفکیک می‌شوند. بدین



شکل ۶- تصویر میکروسکوپی از ژل‌های دارای امولسیون پروتئین آب پنیر با قطره‌های روغن در اندازه: (الف) $1 \mu\text{m}$ ، (ب) $6 \mu\text{m}$ و (پ) $12 \mu\text{m}$ [۷].

مدول ژل بیشتر باشد [۲۶].
Sala و همکاران در مطالعه‌ای، اثر غلظت قطره‌های امولسیون و نوع ژل را بر ادراک حسی ژل‌های پر شده امولسیونی بررسی کردند. آن‌ها دریافتند، اثر برهم‌کنش قطره و ژل بر ادراک حسی از اثر خواص شکست ژل اهمیت بیشتری دارد [۲۷].
باتوجه به نمونه‌های گفته شده، اهمیت پی‌بردن به خواص ژل و قطره و برهم‌کنش میان آن‌ها مشهود است. در دهه اخیر، میکرورنولوژی الکتریکی به‌عنوان ابزاری برای تشخیص خواص

بررسی شده است. بسته به ماهیت قطره‌ها و شبکه ژل دو حالت عمده می‌تواند رخ دهد:

- هیچ برهم‌کنشی میان قطره‌های پخش شده و ژل رخ ندهد. در این حالت، در تغییرات اندک شکل‌های ژل، افزایش کسر حجمی قطره‌ها موجب کاهش مدول کشسانی ژل می‌شود.

- میان قطره و ژل برهم‌کنش زیادی برقرار است. در این حالت، در تغییر شکل‌های کم در ژل، افزایش کسر حجمی قطره‌ها به افزایش مدول کشسانی منجر می‌شود، به شرط آن که مدول آن‌ها از

جدید از مواد می‌تواند از کاربری ویژه‌ای در زمینه‌های متنوع مانند سامانه‌های میکروسیالی، دارورسانی، مهندسی بافت و صنایع غذایی برخوردار باشد. محیط انعطاف‌پذیر هیدروژل‌ها باعث شده است، گونه‌های نوین کامپوزیت‌های بر پایه هیدروژل و هیدروژل‌های پر شده امولسیون‌ی از آن پدید آیند و نقش جدیدی را در سامانه‌های انتقال ایفا کنند. با وجود این، هیدروژل‌ها به سبب ناشناخته بودن بسیاری از خواص مکانیکی و انتقالی، ظرفیت مطالعاتی زیادی دارند. با انجام این کار می‌توان کاربرد هیدروژل‌ها را بهبود بخشید و چه بسا از آن در سایر زمینه‌ها نیز بهره جست.

مراجع

- Osada Y., Gong J.P., and Tanaka. Y., Polymer Gel, *J. Macromol. Sci., Polym. Rev.*, **44**, 87-112, 2004.
- Matos M.A. and White L.R., Electroosmotically Enhanced Mass Transfer through Polyacrylamide Gel, *J. Colloid Interface Sci.*, **300**, 429-436, 2006.
- Matos M.A. and White L.R., Enhanced Mixing in Polyacrylamide Gels Containing Embedded Silica Nanoparticles as Internal Electroosmotic Pumps, *Colloids Surf. B*, **61**, 262-269, 2008.
- Mohammadi A., Electric-field-induced Response of a Droplet Embedded in a Polyelectrolyte Gel, *Phys. Fluids*, **25**, 1243-1265, 2013.
- Komarova G.A. and Starodustev G., Intelligent Gels and Cryogels with Embedded Emulsions of Various Oils, *J. Appl. Polym. Sci.*, **127**, 2703-2709, 2012.
- Sala G., van Vilet T., and Stuart M.A.C., Deformation and Fracture of Emulsion-filled Gels: Effect of Oil Content and Deformation Speed, *Food Hydrocolloids*, **23**, 1381-1393, 2009.
- Shingel K.I., Roberge C., and Zabeida O., Solid Emulsion Gel as a Novel Construct for Topical Applications: Synthesis, Morphology and Mechanical Properties, *J. Mater. Sci.*, **20**, 681-689, 2009.
- Mohammadi A., Transport in Droplet-hydrogel Composites: Response to an External Stimuli, *Colloid Polym. Sci.*, **293**, 941-962, 2014.
- Sala G., van Aken G.A., Cohen M.A.C., and van de Velde F., Effect of Droplet-matrix Interactions on Large Deformation Properties of Emulsion-filled Gels, *J. Texture Stud.*, **38**, 511-535, 2007.
- Mohammadi A., Electrokinetic Mixing and Displacement of Charged Droplets in Hydrogels, *Transp. Porous Media*, **104**, 469-499, 2014.
- Shapiro J.M. and Oyen M.L., Hydrogel Composite Materials for Tissue Engineering Scaffold, *J. Minerals*, **65**, 505-516, 2013.
- Pal K., Banthia A.K., and Majumdar D.K., Polymeric Hydrogels: Characterization and Biomedical Applications – A Mini Review, *Des. Monomers Polym.*, **12**, 197-220, 2009.
- Lowman A.M. and Dziubla T.D., Structural and Dynamic Response of Neutral and Intelligent Networks in Biomedical Environment, *Adv. Chem. Eng.*, **29**, 75-130, 2004.
- Qiu Y. and Park K., Environment-sensitive Hydrogels for Drug Delivery, *Adv. Drug Delivery Rev.*, **53**, 321-339, 2001.
- Kim D. and Beebe D.J., Hydrogel-based Reconfigurable Components for Microfluidic Devices, *Lab Chip*, **7**, 193-198, 2007.
- Eddington D.T. and Beebe D.J., Flow Control with Hydrogels, *Adv. Drug Delivery Rev.*, **56**, 199-210, 2004.
- Bassetti M.J. and Chatterjee A.N., Development and Modeling of Electrically Triggered Hydrogels for Microfluidic Applications, *J. Microelectromech.*, **14**, 1198-1207, 2005.
- Beebe D.J., Moore J.S., and Bauer J.M., Functional Hydrogel Structures for Autonomous Flow Control Inside Microfluidic Channels, *Nature*, **404**, 588-590, 2000.
- Hill J.R., Electric-field-enhanced Transport in Polyacrylamide Hydrogel Nano-composites, *J. Colloid Interface Sci.*, **316**,

نتیجه‌گیری

باتوجه به موضوع‌های مطرح شده، هیدروژل به عنوان گونه‌ای

- 635-644, 2007.
20. Sershen S., Westcott S.L., Halas N.J., and West J.L., Temperature-sensitive Polymer-Nanoshell Composites for Photothermally Modulated Drug Delivery, *J. Biomed. Mater. Res.*, **51**, 293-298, 2000.
 21. Mao L., Roos Y.H., and Miao S., Study on the Rheological Properties and Volatile Release of Cold-Set Emulsion-Filled Protein Gels, *J. Agric. Food Chem.*, **62**, 11420-11428, 2014.
 22. Chen J. and Dickinson E., Effect of Surface Character of Filler Particles on Rheology of Heat-set Whey Protein Emulsion Gels, *Colloids surf.*, **12**, 373-381, 1999.
 23. McClements M.D.J., Effect of Emulsion Droplets on Rheology of Whey Protein Isolate Gels, *J. Texture Stud.*, **24**, 411-422, 1993.
 24. Langley K.R. and Green M.L., Compression Strength and Fracture Properties of Model Particulate Food Composites in Relation to Their Microstructure and Particle-matrix Interaction, *J. Texture Stud.*, **20**, 191-207, 1989.
 25. Chojnicka A., Sala G., Kruif C.G., and Velde van de, The Interactions between Oil Droplets and Gel Matrix Affect the Lubrication Properties of Sheared Emulsion Filled Gels, *Food Hydrocolloids*, **23**, 1038-1046, 2009.
 26. Vliet T.V., Rheological Properties of Filled Gels; Influence of Filler Matrix Interaction, *Colloid Polym. Sci.*, **266**, 518-524, 1988.
 27. Sala G., van de Velde F., Stuart M.A.C., and van Aken G.A., Oil Droplet Release from Emulsion-filled Gels in Relation to Sensory Perception, *Food Hydrocolloids*, **21**, 977-985, 2007.