

## طراحی و ساخت نانو هیدروژل‌های سه‌بعدی بر پایه پتیدهای خود آراینده جهت مهندسی بافت‌های نرم

الهه روشنی یساقی<sup>۱</sup>، مجید تقدیر<sup>۲</sup>، محمدعلی شکرگزار<sup>۳\*</sup> و حسین نادری منش<sup>۲،۱\*</sup>

<sup>۱</sup> تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده علوم زیستی، گروه نانو بیوتکنولوژی

<sup>۲</sup> تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده علوم زیستی، گروه بیوفیزیک

<sup>۳</sup> تهران، انستیتو پاستور ایران، بخش بانک سلولی

تاریخ دریافت: ۹۴/۶/۱ تاریخ پذیرش: ۹۴/۸/۱۵

### چکیده

هیدروژل‌های تزریقی از جمله مواد مناسب در مهندسی بافت‌های نرم هستند. امروزه یکی از اهداف بیولوژی سنتزی، طراحی و تولید زیست مواد هیدروژل شونده است که ضمن داشتن ویژگی‌های فیزیکی مناسب قادر به خودآرایی درجا در شرایط درون تنی باشند. پتیدهای دوگانه دوست گروهی از این مواد هستند. شبیه‌سازی هرچه بهتر ماتریکس خارج سلولی بافت‌های نرم با هیدروژل‌های حاصل از خودآرایی پتیدهای دوگانه دوست، مستلزم بهینه‌سازیهای زیستی، شیمیایی و فیزیکی است. در این تحقیق هدف ساخت هیدروژل‌های سه‌بعدی نانوکامپوزیتی با خواص زیستی و مکانیکی متفاوت است که طی فرآیند هم‌آرایی و تنها با تغییر نسبت پپتید دوگانه دوست و دو مشتق زیست فعال آن، به وجود آمده باشند. برای بهینه نمودن فرآیند هم‌آرایی و بررسی اثرات احتمالی ناشی از وجود توالیهای مختلف زیست فعال بر ویژگیهای هم‌آرایه‌های نهایی از روشهای طیف‌سنجی همچون FTIR و CD در کنار روشهای میکروسکوپی مانند TEM و AFM استفاده شده است. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که نه تنها مقادیر هر یک از مولکولها در هم‌آرایی بلکه درصد آب‌گریزی و آب‌دوستی بخش زیست فعال آنها نیز بر قدرت و جهت‌گیری پیوندهای هیدروژنی، میانکنشهای بین فیبری و پایداری نهایی هیدروژلها مؤثر است. بنابراین می‌توان بدون تغییر در بخشهای اصلی تشکیل دهنده مولکولهای دوگانه دوست و تنها با طراحی هم‌آرایه‌های مناسب میان این مولکولها و مشتقاتشان به هیدروژلهایی با خواص متفاوت رسید.

**واژه‌های کلیدی:** پپتید دوگانه دوست، خودآرایی، هم‌آرایی، هیدروژل، نانوفیبر، خواص مکانیکی

\* نویسنده مسئول، تلفن: ۰۲۱۸۲۸۸۴۴۱۰، پست الکترونیکی: naderman@modares.ac.ir

\*\* نویسنده مسئول، تلفن: ۰۲۱۶۶۴۹۲۵۹۵، پست الکترونیکی: mashokrgozar@pasteur.ac.ir

### مقدمه

(*situ*)، پر کردن ناحیه صدمه‌دیده و اتصال مناسب با آن بدون نیاز به بخیه زدن، زیست سازگاری (Biocompatibility) و زیست تخریبی (Biodegradability) اشاره کرد (۱۴ و ۲۰). در دهه گذشته مواد و مشتقات طبیعی و مصنوعی متعددی برای تولید هیدروژل‌های قابل تزریق در مهندسی بافت‌های نرم

هیدروژل‌های تزریقی از جمله مواد مناسب در مهندسی بافت‌های نرم هستند. این مواد از نظر محتوای آبی شبیه بافت‌های نرم بوده و ضمن محصور کردن (Entrapment) همگن سلولها شرایط مناسبی را برای تبادل مناسب متابولیتها، گازها و مواد مغذی برای آنها فراهم می‌کنند. از مزایای این مواد می‌توان به توانایی ژل شدن در محل (In

آلکیلی شامل یک توالی اسیدآمینه‌ای آب‌گریز و تکرار کوتاهی از یک اسیدآمینه باردار است. اولین بخش پپتیدی به دلیل آب‌گریز بودن ضمن افزایش خاصیت آب‌گریزی کل مولکول در تشکیل ساختار صفحات بتا بین‌مولکولی مشارکت می‌کند و نقش بسیار مهمی را در هدایت شکل نانو ساختار نهایی از وزیکول به فیبر بر عهده دارد، بخش اسیدآمینه‌های باردار در انحلال بهتر مولکول در محیط آبی مؤثر است ضمن اینکه آغاز خودآرایی با غربال بارهای این ناحیه همراه است. البته لازم به ذکر است در مشتقات زیست فعال (Bioactive derivatives) این مولکولها دو جزء پپتیدی دیگر به بخشهای یادشده اضافه می‌شود که شامل ترادفی از اسیدآمینه‌های کوچک با انعطاف‌پذیری بالا و نهایتاً بخش زیست فعال است. توالی اسیدآمینه‌ای با انعطاف‌پذیری بالا به‌عنوان رابط (Linker) عمل کرده و ضمن اتصال بخش زیست فعال (Bioepitope) به دیگر بخشهای مولکول از اثرات احتمالی و ممانعت‌های فضایی بخش زیست فعال بر تشکیل ساختار صفحات بتا جلوگیری می‌کند. آخرین بخش شامل توالی زیست فعال است که نوع ترادف اسیدآمینه‌ای آن بسته به هدف و نوع بافت موردنظر تعیین می‌شود و می‌تواند شامل مشتقات توالیهای متصل شونده به گیرنده‌های سطح سلول، توالیهای نماینده فاکتورهای رشد یا پروتئینهای حیاتی ماتریکس خارج سلولی و یا توالیهای متصل شونده به این مواد باشد (۵، ۶، ۷ و ۱۱). در دهه گذشته مکانیسم خودآرایی و هیدروژل شدن این بیومواد مشخص شده است. خودآرایی در این مولکولها با قرار گرفتن در محیطهای آبی و در حضور نمکهای چند ظرفیتی یا تغییرات pH به‌عنوان غربالگرهای (Screeners) نیروهای دافعه بین‌مولکولی، آغازشده و با برقراری برهمکنشهای آب‌گریز بخشهای آلکیلی و تشکیل ساختارهای دوم بتا بین‌مولکولی، هیدروژلی با بافت نانو فیبری (Nano-fibrillar texture) حاصل می‌شود (۳، ۵، ۱۶ و ۲۴). امروزه یکی از مسائل قابل‌توجه در این زمینه بررسی اثرات هم‌آرایی (Co-

استفاده‌شده‌اند. پلیمرهای طبیعی هرچند زیست سازگار و زیست تخریب‌پذیر بوده و دارای پیامهای مناسب رشد سلولها هستند ولی استفاده از آنها همواره با محدودیتهایی همچون پاسخهای ایمنی احتمالی و تخریب سریع در شرایط درون تنی (In vivo) همراه بوده است. پلیمرهای مصنوعی نیز با وجود آنکه محدودیتهای پلیمرهای طبیعی را از نظر سرعت تخریب بالا ندارند ولی فاقد هرگونه پیام مناسب برای رشد و تکثیر سلولی بوده و امکان بروز پاسخهای ایمنی پس از استفاده از این هیدروژلهای مصنوعی وجود دارد (۲۰). اما امروزه با ایجاد زمینه مطالعاتی میان‌رشته‌ای جدیدی تحت عنوان بیولوژی سنتزی (Synthetic biology)، طراحی و تولید مواد جدیدی که خواص مناسب هر دو نوع پلیمرهای طبیعی و مصنوعی را در خود داشته باشند، رشد فزاینده‌ای داشته است (۴). به عنوان مثال از این زیست مواد جدید می‌توان به پپتیدهای دوگانه‌دوست (Peptide amphiphiles) اشاره کرد. پپتیدهای دوگانه‌دوست گروهی از بیومواد باقابلیت خودآرایی (Self-assembly) هستند که در حضور محلولهای آبی آرایه‌های فیبری با ابعاد نانومقیاس ایجاد می‌کنند. به عبارتی همان‌طور که از تعریف خودآرایی قابل استنباط است این مواد با قرار گرفتن در شرایط خاص و بدون اعمال نیروی بیرونی تنها با برقراری پیوندهای غیر کوالان همچون میانکنشهای آب‌گریز، واندروالسی، یونی و هیدروژنی قادرند به ساختارهای فوق مولکولی (Supramolecular structures) منظمی سازمان‌دهی شوند. کلیه اعضای این بیومواد دارای یک دم غیر پپتیدی و یک سر پپتیدی هستند. بخش دمی اغلب شامل یک آلکیل (۱۰ تا ۲۲ کربنه) بوده و بخش سری خود دارای زیربخشهایی است که هرکدام بسته به وظیفه‌ای که در مولکول نهایی ایفا می‌کنند دارای ویژگیهای منحصر به فرد فیزیکی-شیمیایی هستند (۵). دم آلکیلی وظیفه تأمین ویژگی آب‌گریزی در مولکول را به عهده دارد و طی فرآیند خودآرایی بخش مرکزی نانو فیبرها را تشکیل می‌دهد. زیر بخشهای پپتیدی به ترتیب نزدیکی به دم

## مواد و روشها

**مواد:** رزین وانگ (Wang resin) و کلیه اسیدهای آمینه از شرکت BACHEM (سویس) تهیه شد. تمامی حلال‌های آلی شامل دی‌متیل فرامید (Dimethylformamide, DMF)، بنزو تریازولیل تترامتیل اورانیوم تترافلوربورات O-(Benzotriazol-1-yl)-N,N,N',N'- (tetramethyluronium tetrafluoroborate, TBTU) دی‌ایزو پروپیل اتیل آمین (N,N-Diisopropylethylamine, DIEA)، متیل پیرولیدون (N-Methyl-2-pyrrolidone, NMP)، پایپریدین (Piperidine)، تری فلئورواستیک اسید (Trifluoroacetic acid, TFA)، تری‌ایزو پروپیل سیلان (Triisopropylsilane, TIS)، دی‌اتیل اتر (Diethyl ether)، اتانول، ایزوپروپانول، استونیتریل (Acetonitrile) و موادی مثل نین هیدرین (Ninhydrin) آمونیوم هیدروکسید، سدیم هیدروکسید، پالمیتیک اسید (Plamitic acid) و نمک‌های کلریدی سدیم، پتاسیم و کلسیم از شرکت Merck (آلمان) خریداری شد.

**ساخت پیپتیدهای دوگانه‌دوست:** ساخت پیپتیدهای دوگانه-دوست به صورت دستی بر اساس روش فاز جامد (Solid-phase methodology) بر روی رزین وانگ انجام شد. به طور خلاصه، در گام اول رزین سه بار به مدت پنج دقیقه در حلال آلی دی‌متیل فرم آمید قرار داده شد تا کاملاً متورم (Swelled) شود. سپس رزین متورم شده سه بار به مدت پنج دقیقه با محلول پایپریدین ۲۰ درصد (حجمی) در دی‌متیل فرم آمید تحت تیمار قرار گرفت تا عامل Fmoc محافظت‌کننده گروه‌های آمین آن برداشته شود. در مرحله بعد رزین بی‌حفاظ شده (Deprotected resin) به مدت چهار دقیقه در مجاورت محلول اتصال (Coupling solution) قرار گرفت. محلول اتصال شامل اسیدآمینه حفاظت‌شده با Fmoc، محلول‌های آلی TBTU (۱ مولار در حلال دی‌متیل فرم آمین) و DIEA (۰/۴ مولار در حلال دی‌متیل فرم آمین) است که به ترتیب در مقادیر

یک پیپتید دوگانه‌دوست با مشتقات زیست فعال متفاوت خود بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی نانو کامپوزیت‌های حاصله است. چنین مطالعاتی نه تنها مبدع روشی نوین در تولید نانو مواد جدید هستند بلکه گامی مؤثر در توسعه فناوری پیپتیدهای دوگانه‌دوست در شبیه‌سازی زیستی هر چه بهتر ماتریکس خارج سلولی (Extra cellular matrix) جهت فرآیندهای ترمیمی یا مهندسی بافت به شمار می‌روند. داده‌های بسیاری بر این نکته تأکید دارند که فارغ از اثرات مؤثر حضور و دانسیته توالی‌های زیست فعال مناسب، همخوانی خواص مکانیکی داربست با ماتریکس خارج سلولی ناحیه صدمه‌دیده نیز یکی از فاکتورهای بسیار مؤثر در تعیین سرنوشت سلول‌ها و تنظیم رفتارهایی همچون تکثیر، مهاجرت و تمایز آنها است (۸، ۹، ۱۰، ۱۲، ۱۵، ۱۷ و ۱۹). بنابراین در طراحی یک ماتریکس خارج سلولی مصنوعی بر پایه پیپتیدهای دوگانه-دوست به‌عنوان یک نانو داربست (Nano-scaffold) سه‌بعدی، ضمن توجه به بهینه‌سازی خواص زیستی این هیدروژل بسته به بافت هدف، باید به همخوانی مؤلفه‌های مکانیکی آن نیز توجه ویژه داشت. هدفی که از طرق مختلفی چون تغییر ساختار شیمیایی پیپتیدهای دوگانه-دوست، استفاده از نسبت‌های مختلف مشتقات زیست فعال آنها به‌عنوان واحدهای هم‌آراینده و تغییر شرایط خودآرایی محقق می‌شود (۵ و ۲۳). در بررسی حاضر با بهینه‌سازی شرایط هم-آرایی یک پیپتید دوگانه‌دوست و دو مشتق زیست فعال آن و تغییر نسبت‌های اجزاء مشارکت‌کننده در این فرآیند به نانو کامپوزیت‌هایی بهینه از نظر شرایط زیستی و مکانیکی جهت مهندسی بافتهای نرم پرداخته شده است. داده‌های حاصل نشان می‌دهند، غلظت یونهای نمکی در بافر ژل‌کننده (Gelation buffer) و تغییر مقادیر هرکدام از پیپتیدهای دوگانه‌دوست می‌توانند بر ویژگی‌های ساختار نهایی خودآرایی (Assembly) مؤثر بوده و بر خواص مکانیکی هیدروژل نهایی تأثیر به‌سزایی داشته باشند.

چهار برابر مکانهای فعال رزین، ۰/۹۵ و ۲/۵ برابر مقدار اسیدآمینه با یکدیگر مخلوط شده‌اند. اتصال اسیدآمینه‌های بعدی تا آخرین اسیدآمینه طبق روش ذکر شده انجام شد. لازم به ذکر است پس از پایان هر مرحله حذف Fmoc و اتصال اسیدآمینه، رزین ابتدا با حلال دی‌متیل فرم‌آمید سه بار به مدت ۵ دقیقه شستشو شد و مقدار بسیار اندکی از آن تحت آزمون کایسر (kaiser) قرار گرفت. در صورت موفقیت‌آمیز بودن هرکدام از فرآیندهای مذکور به ترتیب رزینها رنگهای آبی و زرد را نشان می‌دادند. آلکیل‌کردن پپتیدهای ساخته‌شده بعد از تأیید حذف Fmoc از آخرین اسیدآمینه آنها انجام شد. این فرآیند مشابه مرحله اتصال اسیدهای آمینه است و محلول اتصال آن نیز با همان نسبت‌های ذکر شده تهیه گردید. با این تفاوت که در این محلول به جای اسیدآمینه از پالمیتیک اسید استفاده شد. با منفی شدن نتیجه آزمون کایسر اتصال اسید چرب به آخرین اسیدآمینه تأیید شد. جهت جدا کردن رزین از پپتیدهای دوگانه‌دوست، رزین مرحله قبل به مدت ۲/۵ تا ۳ ساعت در مجاورت کوکتل هضم (Cleaving cocktail) قرار گرفت. محتوای این کوکتل شامل تری‌فلوئورو استیک اسید: تری‌ایزو پروپیل سیلان: آب (TFA:TIS:H<sub>2</sub>O) است که با نسبت‌های ۲/۵: ۲/۵: ۹۵ با یکدیگر مخلوط شده‌اند. پس از جداسازی، محلول پپتید دوگانه‌دوست تا رسیدن به نقطه ابری (Cloudy point) و حذف تری‌فلوئورو استیک اسید، در دستگاه خلأ چرخان (Rotary evaporator) قرار داده شد. محلول باقی‌مانده بعد از مخلوط شدن با دی‌اتیل اتر سرد به مدت یک شب در دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد قرار داده شد تا پپتیدهای دوگانه‌دوست به‌خوبی رسوب کنند. مخلوط حاصل به مدت ۱۰ دقیقه در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد و ۲۰۰۰g سانتریفیوژ شده و سه بار با دی‌اتیل اتر سرد شستشو داده شد و برای انحلال رسوب پپتید دوگانه‌دوست حاصل در آب pH آن با کمک آمونیوم هیدروکسید به ۹ رسانده شد. تخصیص پپتیدهای دوگانه-دوست ساخته‌شده توسط دستگاه HPLC (Agilent, Inc.)

انجام گرفت. بافرهای HPLC شامل آب و استونیتریل بود که به هرکدام به میزان ۰/۱ درصد حجمی آمونیوم هیدروکسید اضافه شد. جمع‌آوری نمونه در طول موج جذبی ۲۲۰ نانومتر انجام شد. محصول نهایی توسط طیف‌سنجی جرمی (Mass spectrometry) تأیید شد.

**خواص فیزیکی - شیمیایی پپتیدهای دوگانه‌دوست:**  
خواص فیزیکی - شیمیایی بخش پپتیدی پپتیدهای دوگانه-دوست با استفاده از نرم‌افزار (Protean (DNASTAR, Inc.) مورد بررسی قرار گرفته شد. خواص ارائه‌شده شامل تعیین توزیع بارهای مثبت یا منفی و متوسط آنها در هر پپتید و تعیین بخشهای آب‌گریز، سطحی و منعطف هر پپتید به ترتیب بر اساس درصد آب‌گریزی، احتمال تمایل قرارگیری آنها در سطح و انعطاف‌پذیری ترادف اسیدآمینه‌ای آن، می‌باشد.

**تهیه هیدروژل:** محتوای، توالی و بار هرکدام از پپتیدهای دوگانه‌دوست مورد آزمایش در جدول ۱ آورده شده است. در این بررسی سه نوع محلول پپتیدی با غلظت نهایی یکسان ۱/۴ درصد وزنی/حجمی ولی با محتوای متفاوتی از هر سه نوع پپتید دوگانه‌دوست تهیه شد. برای آماده‌سازی این محلولها ابتدا محلول حاوی هر پپتید به طور جداگانه در ظروف شیشه‌ای تهیه‌شده و سپس با توجه به جدول ۲ با یکدیگر مخلوط شد. نکته قابل‌توجه آنکه به خاطر ماهیت اسیدی پپتیدهای دوگانه‌دوست مورد استفاده در این بررسی، به‌محض اضافه کردن پودر آنها به آب با pH خنثی، pH محلول سریعاً و به شدت اسیدی شده و پپتیدها رسوب می‌کردند. بنابراین برای رسیدن به یک محلول شفاف پپتیدی مقداری محلول نیم مولار سدیم هیدروکسید به صورت قطره‌قطره به محلول اضافه گردید تا با رسیدن pH به حدود ۷/۵-۸ محلولهای پپتید دوگانه‌دوست مورد نظر فراهم شود. فرآیند هم‌آرایی این مولکولهای پپتیدی و ایجاد هیدروژل با اضافه کردن بافر ژل‌کننده (بافر

فسفات حاوی مقدار مناسبی نمک کلرید کلسیم) به محلول پیتیدی و انکوباسیون (Incubation) آن در دمای ۳۷ درجه سانتی گراد به مدت ۳۰ دقیقه انجام شد.

جدول ۱- توالی و بار پپتیدهای دوگانه‌دوست

پپتیدهای دوگانه‌دوست	توالی	بار
پپتید دوگانه‌دوست اول	$C_{H3}(CH_2)_{14}CO.V_3A_3E_3$	-۴
پپتید دوگانه‌دوست دوم	$C_{H3}(CH_2)_{14}CO.V_3A_3E_3G_3K_3RGDFK$	-۱
پپتید دوگانه‌دوست سوم	$HSNGLPLG_3E_3A_3V_3(K)-CO(CH_2)_{14}CH_3$	-۲

بار منفی میانکنش دهد و یا به خاطر ممانتهای فضایی مولکول نتواند همزمان با دو بخش آن ارتباط برقرار کند به ترتیب ۲۰ یا ۴۰ میلی مولار محاسبه شد. اما در عمل برای به دست آوردن غلظت بهینه نمک کلرید کلسیم در بررسی حاضر فرآیند ژل شدن هیدروژلهای طراحی شده در حضور بافر فسفات (Phosphate buffer saline, PBS) حاوی غلظتهای ۲۵، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ میلی مولار کلرید کلسیم مورد بررسی قرار داده شد.

بار کلی محلولهای پپتید دوگانه‌دوست مورد استفاده در هر هیدروژل (در  $pH=8-7/5$ ) در جدول ۲ آورده شده است. بنا بر محاسبات تئوری می‌تواند یک یون کلسیم به ازای هر دو بار منفی محلول پیتیدی جهت غربال بار آن در نظر گرفته شود. هرچند این محاسبات به لحاظ تئوری منطقی و صحیح به نظر می‌رسد اما شاید در عمل احتساب یک یون به ازاء هر دو بار منفی نتیجه مطلوبی ندهد. بنابراین غلظت تئوری یون کلسیم مورد نیاز با فرض اینکه هر یون کلسیم می‌تواند با دو

جدول ۲- مقادیر وزنی حجمی پپتیدهای دوگانه‌دوست و بار کلی محلول پیتید دوگانه‌دوست هر هیدروژل

پپتیدهای دوگانه‌دوست	پپتید دوگانه‌دوست اول (میلی گرم در ۱۰۰ میکرو لیتر)	پپتید دوگانه‌دوست دوم (میلی گرم در ۱۰۰ میکرو لیتر)	پپتید دوگانه‌دوست سوم (میلی گرم در ۱۰۰ میکرو لیتر)	بار کلی ( $pH=8-7/5$ )
هیدروژل‌ها				
خودآرایی پپتید دوگانه‌دوست اول	۱/۴	-	-	-۴۵/۰۴
هم‌آرایی ۱	۱/۱	۰/۲	۰/۱	-۳۹/۷۹
هم‌آرایی ۲	۰/۹۹	۰/۴	۰/۱	-۳۶/۸۲
هم‌آرایی ۳	۱	۰/۲	۰/۲	-۳۷/۲۳

همچون طیف‌سنجی تبدیل فوریه فروسرخ (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR) و دورنگ نمای حلقوی (Circular Dichroism, CD)، و روشهای میکروسکوپی مانند میکروسکوپ الکترونی عبوری (Transmission Electron Microscopy, TEM) و

تعیین خصوصیات هیدروژلهای: صحت ساخت پپتیدها و تخلیص آنها از طریق HPLC و طیف‌سنجی جرمی تأیید شد. اما به منظور بررسی خصوصیات هیدروژلهای تهیه شده از روشهای مختلفی دیداری مانند آزمون ویال وارن (Inverted vial) و رنگ هیدروژل، روشهای طیف‌سنجی

صورت مستقیم در کووت انجام شد و پس از اتمام زمان انکوباسیون در دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد نمونه‌ها برای خوانش آماده شدند. این کار سه بار تکرار شد و پیش از رسم طیف‌های مربوطه اثر ضمیمه بافر از آنها کسر شد.

**میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM):** جهت اطمینان از ساختار نانو فیبری بافت هیدروژل‌ها و تعیین ابعاد دقیق این نانو ساختار توسط میکروسکوپ Philips CM30، تصاویری از نمونه‌ها در شرایط رقیق بر روی گرید مسی با پوشش کربن (carbon-coated copper grid) و اندازه مش (Mesh) ۳۰۰ اینچ در ولتاژ ۱۵۰ کیلووات تهیه شد. روش قطره (Droplet method) برای تهیه نمونه‌ها استفاده شد. در این روش هیدروژل‌ها پس از استراحت به مدت یک‌شب در دمای اتاق به هدف پیر شدن (Aging) با آب پانزده بار رقیق شدند. ۱۰ میکرو لیتر از هر نمونه بر سطح کدر گرید قرار داده شد و پس از گذشت حدوداً یک دقیقه و اطمینان از جذب سطحی نمونه توسط گرید، ۱۰ میکرو لیتر از رنگ اورانیل استات (uranyl acetate) (یک درصد وزنی حجمی در آب) به آن اضافه شد و در نهایت رطوبت اضافی توسط کاغذ صافی به‌آرامی از گوشه گرید حذف گردید.

**میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM):** خواص مکانیکی هیدروژل‌ها با کمک میکروسکوپ نیروی اتمی (model nano wizard II, JPK, Germany) با تیپ کانوایکال و ثابت فنر ۰/۱۲ N/m اندازه‌گیری شد. بعد از تهیه هر سه هیدروژل، ظرف حاوی هیدروژل با بافر فسفات پر شد به‌طوری‌که نوک تیپ برای برقراری تماس با نمونه درون محلول قرار گیرد. مدول یانگ (Yung modulus) هر نمونه بر اساس معادله زیر و با انطباق (Fitting) داده‌های نمودار انحراف کنتیلور در مقابل جابجایی پیروزو بر مدل conic Hertz به دست آمد. در این معادله  $\nu$  ضریب پواسان است و مقدار آن معمولاً ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود، F نیروی

میکروسکوپ نیروی اتمی (Atomic Force Microscopy, AFM) استفاده شد.

**آزمون ویال وارن و رنگ هیدروژل:** روش ویال وارن از جمله روش‌های شهودی معتبری است که از آن به منظور تعیین شرایط بهینه تشکیل هیدروژل استفاده شد. در این روش پس از اتمام فرآیند ساخت هیدروژل‌ها در شرایط مورد بررسی، ویال‌ها وارن شدند. اگر شرایط آزمایش مناسب بود و فرآیند ژل شدن به‌خوبی صورت پذیرفته باشد با وارن نمودن ویال، ژل در ته ظرف باقی می‌ماند ولی در غیر این صورت محتوای ویال که حاوی محلول پپتیدی و عامل ژل شونده است بر روی دیواره‌ها روان می‌شد. در ضمن علاوه بر جمع‌آوری داده‌های آزمون مربوطه طی همین بررسی بر اساس شفافیت و کدورت ژلهای تولیدشده داده شهودی تکمیلی دیگری نیز به دست آمد.

**طیف‌سنجی تبدیل فوریه فروسرخ (FTIR):** جهت تأیید تشکیل ساختار دوم صفحات بتا در حین خودآرایی از دستگاه FTIR با مدل IR100 استفاده شد. آماده‌سازی نمونه جهت تهیه طیف FTIR شامل مراحل زیر است. پس از اتمام مراحل تهیه هیدروژل، نمونه‌های به‌دست‌آمده لیوفلیزه شد. سپس همراه با نمک برومید پتاسیم به فرم قرص درآورده شد و داده‌های هر نمونه در محدوده اعداد موجی ۴۰۰۰ تا ۴۰۰ cm<sup>-1</sup> جمع‌آوری شد. این کار سه تکرار شد.

**طیف‌سنجی دورنگ نمای حلقوی (CD):** از این آزمون جهت بررسی تشکیل ساختار صفحات دوم بتا که تأییدی بر الفاکتنده بودن شرایط اعمال‌شده در فرآیند هم‌آرایی و ژل شدن است استفاده شد. داده‌های این بخش با استفاده از دستگاه J-715 CD spectrometer, (JASCO J-715 CD spectrometer, JASCO Inc., Easton, MD) در دمای اتاق، با کووت کوارتز ۱ میلی‌متری، سرعت روبش ۱۰۰ نانومتر بر دقیقه و دامنه طول‌موج روبش ۱۸۵ تا ۲۵۰ نانومتر با فواصل ۰/۱ نانومتر به دست آمد. آماده‌سازی هر سه هیدروژل به

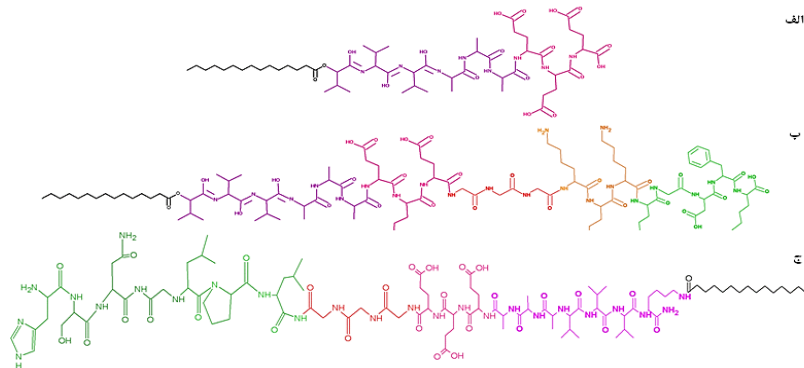
لحاظ تئوری این احتمال وجود دارد که هر دو بار منفی آنها می‌تواند با یک یون کلسیم به‌طور همزمان غربال شود. ناحیه تشکیل‌دهنده بخش زیست فعال پپتید دوگانه‌دوست دوم بیشتر از اسیدآمینه‌های باردار تشکیل شده و به قرارگیری در سطح، برقراری میانکنش‌های الکتروستاتیک و پلهای نمکی تمایل دارد. بخش اعظم ترادف زیست فعال پپتید دوگانه‌دوست سوم ماهیت آب‌گریز داشته و احتمالاً به دلیل عدم تمایل به در معرض بودن با محیط در میانکنش‌های آب‌گریز مشارکت خواهند کرد.

اعمالی، میزان فرورفتگی نمونه و نیم زاویه راس مخروط است.

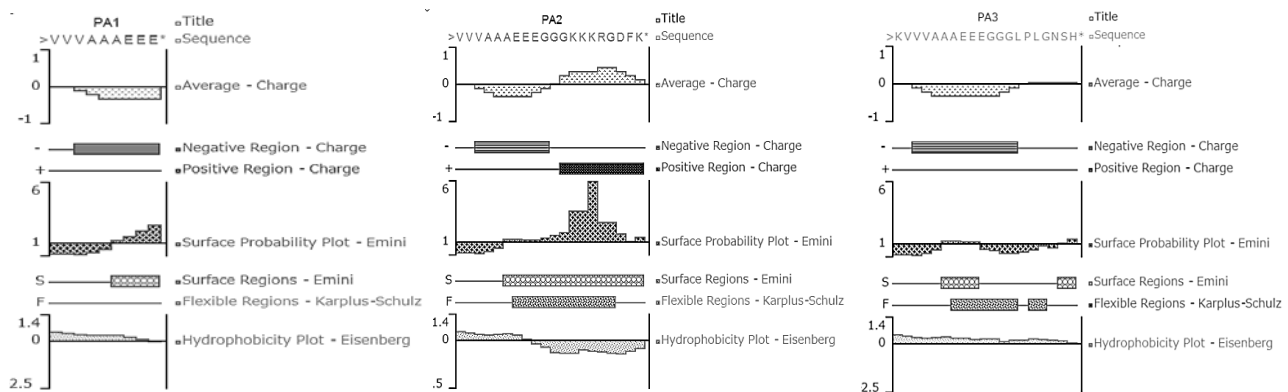
$$F = \frac{F(1 - v_2)\pi}{2v_2 \tan \alpha}$$

## نتایج

**خواص فیزیکی - شیمیایی پپتیدهای دوگانه‌دوست:**  
ساختار مولکولی و خواص فیزیکی - شیمیایی بخش‌های پپتیدی پپتید دوگانه‌دوست اول و دو مشتق زیست فعال آن در شکل های ۱ و ۲ آورده شده است. مؤلفه‌های مورد بررسی نشان می‌دهند که بار نهایی کلیه پپتیدها منفی بوده و در ناحیه منعطف آنها تجمع یافته است و بنابراین به



شکل ۱- ساختار شیمیایی الف) پپتید دوگانه‌دوست اول فاقد هرگونه بخش زیست فعال ب) پپتید دوگانه‌دوست دوم دارای بخش زیست فعال متصل شونده به گیرنده اینتگرین ج) پپتید دوگانه‌دوست سوم دارای بخش زیست فعال متصل شونده به فاکتور رشد  $TGF-\beta$ . در تصاویر رنگ‌های سیاه، بنفش، صورتی، قرمز، نارنجی و سبز به ترتیب معرف دم آلکیلی، بخش تشکیل‌دهنده ساختار بتا، توالی اسیدآمینه‌های باردار، اتصال‌دهنده، ترادف تکراری اسیدآمینه لیزین و بخش زیست فعال است.



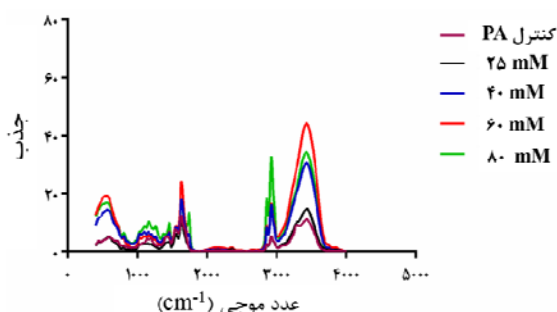
شکل ۲- مقایسه توصیفی خواص فیزیکی و شیمیایی پپتیدهای دوگانه‌دوست (با استفاده از نرم‌افزار protean)

تولیدشده تا حدودی مطابقت دارد و ژل شدن در دو غلظت نمکی ۲۵ و ۴۰ میلی مولار مشهود است اما با توجه به کدورت هیدروژل‌ها در این دو غلظت نمکی به نظر می‌رسید بهترین شرایط برای ژل شدن در غلظت‌های ۶۰ و ۸۰ میلی مولار یون کلسیم به‌دست‌آمده است.

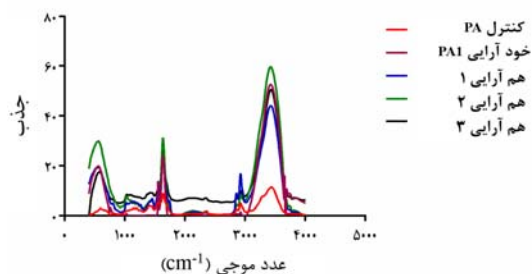
**آزمون ویال وارن و رنگ هیدروژل:** نتایج این آزمون برای شرایط اعمال‌شده در جدول ۳ آورده شده است. همان‌طور که مشهود است رفتار ژل شدن محلول‌های پپتیدهای دوگانه‌دوست در غلظت‌های مختلف یون کلسیم با مقادیر محاسبه‌شده این یون بدون توجه به رنگ ژل‌های

جدول ۳- بار محاسباتی محلول‌های پپتیدی نهایی هر هیدروژل و رفتار هرکدام در غلظت‌های مختلف از نمک کلرید کلسیم

۸۰ میلی مولار	۶۰ میلی مولار	۴۰ میلی مولار	۲۵ میلی مولار	بار محاسباتی	هیدروژل‌ها
ژل شفاف	ژل شفاف	ژل شیری‌رنگ	ژل شیری‌رنگ	-۴۵/۰۴	خودآرایی پپتید دوگانه‌دوست اول
ژل شفاف	ژل شفاف	ژل شیری‌رنگ	ژل شیری‌رنگ	-۳۹/۷۹	هم‌آرایی اول
ژل شفاف	ژل شفاف	ژل شیری‌رنگ	محلول گران‌رو	-۳۶/۸۲	هم‌آرایی دوم
ژل شفاف	ژل شفاف	ژل شیری‌رنگ	محلول گران‌رو	-۳۷/۲۳	هم‌آرایی سوم



شکل ۳- طیف FTIR محلول‌های پپتیدی هم‌آرایی اول در غلظت‌های مختلف نمکی بافر ژل کننده. محلول پپتید دوگانه‌دوست هم‌آرایی اول در بافر ژل کننده فاقد کلرید سدیم به‌عنوان کنترل در نظر گرفته شد.



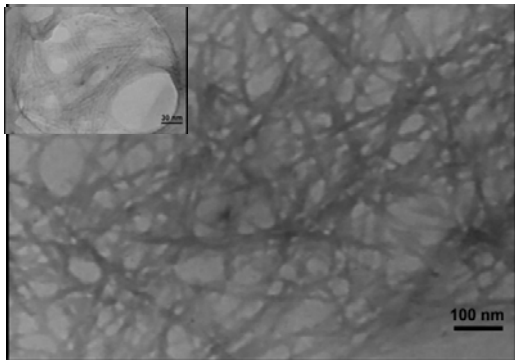
شکل ۴- طیف FTIR هیدروژل‌های مورد بررسی در غلظت نمکی ۶۰ میلی مولار بافر ژل کننده. محلول پپتید دوگانه‌دوست در بافر ژل شونده فاقد کلرید کلسیم به‌عنوان کنترل در نظر گرفته شد.

**طیف‌سنجی دورنگ نمای حلقوی (CD):** تعیین ساختار دوم با کمک روش CD ضمن تأیید داده‌های روش FTIR

**طیف‌سنجی تبدیل فوریه فروسرخ (FTIR):** از این آزمون جهت تأیید تشکیل ساختار دوم صفحات بتا استفاده شد. طیف FTIR مربوط به هم‌آرایی اول تحت شرایط نمکی مختلف در شکل ۳ آمده است. همچنین طیف FTIR کلیه هیدروژل‌های تهیه‌شده در غلظت نمکی ۶۰ میلی مولار در شکل ۴ نمایش داده‌شده است. در هر دو شکل، وجود دو پیک در محدوده‌های  $1630$  و  $1550$   $\text{cm}^{-1}$  تأییدکننده تشکیل ساختار صفحات بتا موازی است و پیک  $2919$  نشانگر تجمع و بسته‌بندی محکم دمه‌های آلکیلی در مرکز ساختار فوق مولکولی هم‌آراینده می‌باشد. ضمناً باند آمیدی A که مربوط به پیوند هیدروژنی است و باید در محدوده  $3225$ – $3280$   $\text{cm}^{-1}$  مشاهده شود در کلیه نمونه‌ها با یک جابه‌جایی در ناحیه  $3400$   $\text{cm}^{-1}$  قابل‌رؤیت است. با احتساب کلیه موارد ذکرشده همان‌طور که از شکل ۳ و ۴ قابل استنتاج است همه شرایط اعمال‌شده می‌توانند باعث آغاز و پیش‌برد فرآیند هم‌آرایی و تشکیل ساختار صفحات بتا در محلول‌های آبی پپتید دوگانه‌دوست شوند در ضمن مشاهده پیک‌های اختصاصی این ساختار دوم حتی در نمونه کنترل که فقط شامل محلول پپتید دوگانه‌دوست است، آغاز تشکیل پیش‌تجمع‌های ساختار صفحات بتا را تأیید می‌کند.



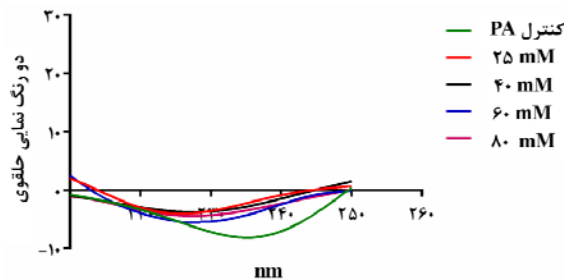
میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM): در تصاویر به‌دست‌آمده از هیدروژلهای رنگ‌آمیزی شده با اورانیل استات ساختارهای نانوفیبری با ابعاد ۸-۱۰ نانومتر (شکل ۷) مشاهده می‌شوند. سطح نانو فیبرها در کلیه تصاویر سیاه و مرکز آنها به رنگ سفید است که با توجه به ماهیت باردار رنگ به‌کاربرده شده در رنگ‌آمیزی و اتصال انتخابی آن به مکانهای باردار می‌توان این‌گونه استنباط کرد که بخش زیست فعال پپتیدهای دوگانه‌دوست طی فرآیند خودآرایی در سطح نانو فیبرها قرار گرفته و بخش مرکزی آنها از تجمع دمه‌های آلکیلی به وجود آمده است.



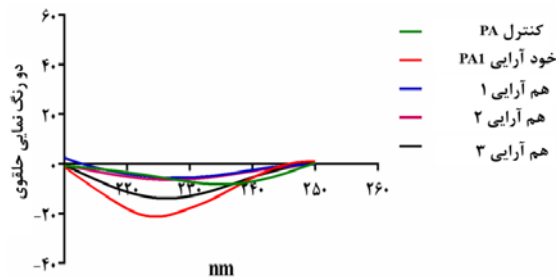
شکل ۷- نمونه‌ای از تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری هیدروژل خودآراینده با بافت نانوفیبری

میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM): نتایج مقاومت مکانیکی هیدروژلهای طراحی‌شده در غلظت ۶۰ میلی مولار نمک کلرید کلسیم در جدول ۴ آورده شده است. همان‌طور که از مقایسه داده‌ها مشهود است. اضافه کردن مشتقات زیست فعال پپتیدهای دوگانه‌دوست به‌عنوان اجزاء هم‌آرای، منجر به افزایش مقاومت مکانیکی هیدروژلهای نسبت به هیدروژل ناشی از خودآرایی پپتید دوگانه‌دوست تنها می‌شود. هیدروژلهای هم‌آرای مختلف طراحی‌شده نیز بسته به مقادیر مورد استفاده از پپتیدهای دوگانه‌دوست دارای مقاومت‌های مکانیکی مختلفی هستند. در این میان هیدروژل حاصل از هم‌آرایی سوم دارای بیشترین مقاومت مکانیکی است و هیدروژل هم‌آرایهای دوم و اول در مکانهای بعدی قرار گرفته‌اند.

معیار کمی‌تری از این نتایج را در اختیار قرار می‌دهد. داده‌های به‌دست‌آمده از هم‌آرایی اول در غلظتهای مختلف نمکی و کلیه هیدروژلهای تولیدشده در غلظت ۶۰ میلی مولار به ترتیب در شکل های ۵ و ۶ آورده شده است. نتایج هم‌آرایی‌ها در کلیه شرایط اعمال‌شده بدون استثنا نسبت به پیک شاخص صفحات بتا که در ۲۱۸nm قرار دارد دارای جابجایی‌های مکانی هستند. و تنها بسته به شرایط اعمال‌شده شامل نوع غلظت نمکی یا مقادیر مولی متفاوت مولکولهای پپتیدی این جابه‌جایی مقادیر متفاوتی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۶ کمترین جابه‌جایی به ترتیب مربوط به غلظت ۶۰ میلی مولار است. بر اساس نتایج شکل ۶ نیز کمترین جابه‌جایی در شرایط نمکی یکسان ۶۰ میلی مولار مربوط به هیدروژل حاصل از خودآرایی پپتید دوگانه‌دوست اول است هیدروژلهای حاصل از هم‌آرایی دوم، هم‌آرایی سوم و هم‌آرایی اول در مراتب بعدی قرار دارند.



شکل ۵- طیف CD محلولهای پپتیدی هم‌آرایی اول در غلظتهای مختلف نمکی بافر ژل کننده. محلول پپتید دوگانه‌دوست هم‌آرایی اول در بافر ژل کننده فاقد کلرید سدیم به‌عنوان کنترل در نظر گرفته شد.



شکل ۶- طیف CD هیدروژلهای مورد بررسی در غلظت نمکی ۶۰ میلی مولار بافر ژل کننده. محلول پپتید دوگانه‌دوست در بافر ژل شونده فاقد کلرید کلسیم به‌عنوان کنترل در نظر گرفته شد.

مانند دیگر غلظتها، هیدروژل می‌شود. داده‌های FTIR مربوطه نیز نتایج آزمون ویال واران را تأیید کرده و نشان می‌دهد که یونهای کلسیم در کلیه این غلظتها می‌توانند الفاکنده تشکیل ساختارهای بتا و در نتیجه هم‌آرایی محلولهای پپتیدی باشند. اما با توجه به رنگ هیدروژلها در غلظتهای مورد بررسی و با مفروض دانستن وجود رابطه مستقیم میان مقاومت مکانیکی هیدروژل و شفافیت آن (۲۲)، به نظر می‌رسد هیدروژلهای حاصل از غلظتهای محاسبه‌شده نسبت به هیدروژلهای غلظتهای ۶۰ و ۸۰ میلی مولار از مقاومت مکانیکی کمتری برخوردارند. با انطباق این داده‌ها با نتایج CD به‌دست‌آمده در شرایط مشابه بهترین شرایط نمکی غلظت ۶۰ میلی مولار است و کمترین جابه‌جایی را نسبت پیک اختصاصی ساختار صفحات بتا در ۲۱۸ نانومتر دارد. در گام بعدی جهت تعیین غلظت کمینه مطلوب برای دیگر هم‌آرایی‌های پپتید دوگانه‌دوست اول تنها به بررسی نتایج دو آزمون شهودی مذکور اکتفا شد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده غلظت ۶۰ میلی مولار برای این دو هم‌آرایی نیز منجر به تولید هیدروژلی شفاف می‌شود. بنابراین به نظر می‌رسد در محاسبه مقدار یون غربال‌کننده محلولهای پپتیدهای دوگانه‌دوست توجه صرف به بار آنها کافی نیست. زیرا در محلولهای آبی یونهای آزاد و پپتیدهای دوگانه‌دوست هر دو آپوشی می‌شوند و زمانی این مولکولها و یونها می‌توانند با یکدیگر میانکنش دهند که مولکولهای آب از سطح آنها برداشته شوند. حذف لایه‌های آب با صرف انرژی همراه است که در مورد مولکولهای کوچکی مثل یونها و مولکولهای بزرگی مانند پپتیدهای دوگانه‌دوست به ترتیب به دلیل تراکم بالای لایه آب پوشی در اطرافشان و تمایل به ماندن در فرم آب پوشی شده، این فرآیند با صرف انرژی بیشتری نیز همراه است. بنابراین به نظر نمی‌رسد تمام یونهای کلسیمی که در محلول وجود دارند به غربال بارهای مولکولهای پپتید دوگانه‌دوست مشغول و یا موفق به انجام این فرآیند شوند (۲۲). بنا بر نتایج به‌دست‌آمده چنین

جدول ۴- مدول یانگ هیدروژلهای مختلف مورد بررسی

مدول یانگ (پاسکال)	هیدروژل‌ها
۵۰۰	خودآرایی پپتید دوگانه‌دوست اول
۳۸۷۹	هم‌آرایی اول
۶۳۸۸	هم‌آرایی دوم
۶۳۳۸۴۵	هم‌آرایی سوم

### بحث

همان‌طور که در مقدمه آمد نیروی غالب در محلول آبی پپتیدهای دوگانه‌دوست نیروی دافعه میان بارهای هم نام مولکولهای پپتیدی است که مانع از نزدیک شدن آنها به یکدیگر و تشکیل میانکنشهای آب‌گریز در دمه‌های آلکیلی و پیوندهای هیدروژنی بین بخشهای مشارکت‌کننده در تشکیل ساختار دوم بتا بین مولکولی می‌شود. اما با افزودن بافر ژل‌کننده و غربال بارهای پپتیدهای دوگانه‌دوست، این مولکولها به اندازه کافی به یکدیگر نزدیک شده، میانکنشهای مذکور برقرار و در نهایت طی فرآیند خودآرایی ساختارهای فوق مولکولی فیبری در مقیاس ۸ تا ۱۰ نانومتر تشکیل می‌شود. مطالعات بسیاری نقش تعیین‌کننده صفحات بتا بین مولکولی را در هدایت ساختار فوق مولکولی به فرم نهایی سیلندری (فیبری) تأیید می‌کنند (۵). بنابراین می‌توان جهت تعیین شرایط بهینه فرآیندهای خودآرایی یا هم‌آرایی میان این پپتیدها ضمن استفاده از روشهای شهودی مانند آزمون ویال واران و توجه به رنگ هیدروژلهای حاصل، تشکیل ساختارهای بتا را نشانه‌ای از ادامه فرآیند خودآرایی و تشکیل نانو ساختارهای فیبری دانست، و از آن به‌عنوان روش تأییدی دیگری در تعیین شرایط بهینه ساخت هیدروژلهای مورد بررسی استفاده کرد (۲). با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از آزمون ویال واران در بررسی غلظت یون کلسیم مناسب برای هم‌آرایی اول، محاسبات تئوری بار خالص با مشاهدات تجربی بدون در نظر گرفتن کدورت هیدروژلهای تولید شده، همخوانی دارد و این محلول پپتیدی در غلظت ۲۵ میلی مولار یون کلسیم

مکانیکی هیدروژل‌های حاصله می‌گذارند. مطالعات انجام شده با میکروسکوپ نیروی اتمی حاکی از آن است که نه تنها هیدروژل حاصل از خودآرایی پپتید اول دارای خواص مکانیکی متفاوتی نسبت به انواع هیدروژل‌های هم‌آرینده خود با مشتقات زیست‌فعالش است بلکه این هیدروژل‌ها نیز خواص مکانیکی متفاوتی از خود بروز می‌دهند. همان‌طور که مطالعات اخیر جوآن (Juan) و همکاران نشان می‌دهد حتی اگر در تمام مشتقات پپتیدهای دوگانه دوست با گروه‌های زیست‌فعال متفاوت از ترادف اسیدآمینه‌ای یکسانی در نزدیک‌ترین بخش به دم آلکیلی استفاده شود، خواص مکانیکی هیدروژل‌های حاصله در شرایط یکسان خودآرایی متفاوت خواهد بود (۱). مطالب ذکر شده ضمن تأیید داده‌های بررسی حاضر این سؤال را مطرح می‌کند که عامل مؤثر بر تفاوت رفتار مکانیکی هیدروژل‌های حاصل چیست و چگونه می‌توان آن را به تغییرات اعمال‌شده نسبت داد. با توجه به گزارش‌ها استاب (Stupp) و همکاران مبنی بر اینکه تشکیل ساختار صفحات بتا در نزدیک‌ترین اسیدآمینه‌ها به دم آلکیلی صورت می‌گیرد و پیوندهای هیدروژنی میان آنها نقش بسیار مهمی در مقاومت مکانیکی آرایه‌های حاصل دارند. هیدروژل‌ها از نظر تشکیل این ساختار در غلظت بهینه ۶۰ میلی‌مولار یون کلسیم مورد بررسی قرار گرفتند هرچند در نگاه اول مشاهدات طیف‌های FTIR هیدروژل‌های مختلف هم‌آرینده و هیدروژل حاصل از خودآرایی پپتید اول کمک‌چندانی به حل مسئله نکرد و به جز یک جابجایی مکانی در باند امید نوع A، تنها نشان‌دهنده تشکیل ساختارهای صفحات بتا در کلیه نمونه‌ها بود ولی با دقت در داده‌های CD به دست‌آمده در شرایط مشابه معلوم شد هرچند تمامی نمونه‌ها نسبت به مکان موجی ۲۱۸ نانومتر دارای جابه‌جایی مکانی هستند ولی میزان جابه‌جایی در آنها برابر نبوده و کمترین و بیشترین میزان جابه‌جایی به ترتیب در هیدروژل حاصل از خودآرایی پپتید اول و نمونه کنترل است و هیدروژل‌های حاصل از هم‌آرایی در حدها این دو شرایط

پیشنهاد می‌شود که، برای محاسبه غلظت یون مورد نیاز نه تنها باید به روابط الکتروستاتیک بلکه به نیروهای آب‌پوشی و پایداری میانکنش یون و پپتید نیز توجه کرد. پس از یافتن غلظت بهینه ۶۰ میلی‌مولار برای تشکیل ساختارهای فوق‌مولکولی از هم‌آرایه‌های مورد بررسی از پپتید دوگانه دوست اول در مرحله بعدی مسئله پیش‌رو این است که آیا هیدروژل‌های به دست‌آمده در عمل واقعاً دارای بافتی نانوفیبری هستند و در صورت داشتن چنین بافتی بخش‌های زیست‌فعال موجود در مشتقات پپتید دوگانه دوست اول در چه بخشی از این نانو فیبرها قرار گرفته‌اند. با توجه به مطالعات ریخت‌شناسی به دست‌آمده از تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی عبوری از نمونه تیمار شده با اورانیل استات شکل ساختارهای فوق‌مولکولی با ریخت‌شناسی کلی نانوفیبری در پی شرایط اعمال‌شده بر محلول‌های پپتیدی تأیید شد. در ضمن با توجه به این نکته که اورانیل استات تنها به بخش‌های آب‌دوست و اختصاصاً باردار تمایل داشته و طی اتصال رنگی سیاه به این بخش‌ها می‌دهد، مشاهده الگوی سیاه و سفید در تمامی نمونه‌ها که به ترتیب مربوط به بخش‌های سطحی و مرکزی نانو فیبرها است مؤید قرارگیری بخش‌های باردار پپتید از جمله بخش زیست‌فعال آن در سطح است. داده‌های ریخت‌شناسی حاضر با نتایج هارتگرینک (Hartgerink) و همکاران مطابقت دارد این گروه تأکید دارد تنها عامل تعیین‌کننده ژئومتری سیلندری نانو فیبرها در خودآرایی‌های حاصل از پپتیدهای دوگانه دوست، چهار اسیدآمینه مجاور دم آلکیلی هستند و این واحدهای ژل‌شونده بسیار سازگار بوده و در هم‌آرایی با دامنه وسیعی از مشتقات زیست‌فعال خود قادرند هیدروژلهایی با بافت نانوفیبری ایجاد کنند بدون آنکه هرگونه تغییر یا کاستی در ریخت‌شناسی خود آرایه‌های فوق‌مولکولی نهایی به وجود آید (۱۱). اما مسئله بعدی قابل‌تأمل این است که تغییرات به وجود آمده در مقادیر پپتید دوگانه دوست و مشتقاتش چه تأثیری بر خواص

قرارگرفته‌اند. با طرح این سؤال که چرا باوجود تأیید داده‌های FTIR مبنی بر تشکیل ساختارهای بتا در طیف‌های CD این هیدروژل‌ها یک جابجایی فاحش دیده می‌شود به نظر می‌رسد تفسیر طیف‌های CD و توجیه دلیل وجود مقادیر متفاوت جابجایی مکانی نسبت به پیک معیار ۲۱۸ نانومتر در کلیه طیف‌های CD این هیدروژل‌ها راه گشای حل مسئله باشد. با توجه به مستندات به‌دست‌آمده از هر دو مطالعه FTIR و CD که مؤید وجود پیش‌تجمع‌هایی در نمونه کنترل است (پدیده‌ای که به‌خوبی با مکانیسم رشد هسته پیشنهادشده برای فرآیند خودآرایی این نوع مولکول‌ها مطابقت دارد (۱۸))، می‌توان بخشی از این جابه‌جایی را به حضور این پیش‌تجمعات و اثرات آنها بر پراکندگی نور در این دو روش طیف‌سنجی، نسبت داد اما با توجه به شواهدی مثل وجود حضور پیک  $2900\text{cm}^{-1}$  در داده‌های FTIR که نشان‌دهنده تجمع و بسته‌بندی محکم زنجیره‌های آلکیلی است و با توجه به تصویر TEM به‌دست‌آمده که مؤید چینش این پپتیدهای دوگانه دوست به فرم نانوفیبری در حال رشد است، می‌توان سهم دیگری از این جابه‌جایی را به‌احتمال پراکندگی نور ناشی از رشد نانو فیبرها نسبت داد (۲۱). البته با استناد به وجود جابه‌جایی در مکان باند آمیدی A که معرف بلندتر شدن طول پیوندهای هیدروژنی شرکت‌کننده در ساختارهای صفحات بتا بوده می‌توان وقایع مولکولی فرآیند خودآرایی را این‌طور نیز مطرح کرد که، مولکول‌های دوگانه دوست طی فرآیند هم‌آرایی به نانو فیبرهایی سازمان‌دهی می‌کنند که بخش مرکزی آنها از تجمع دم‌های آلکیلی تشکیل شده و بخشهای مشارکت‌کننده در تشکیل ساختارهای بین‌مولکولی بتا در سطح آنها مستقر هستند که این آرایش صفحات در راستای طول نانو فیبرهای در حال رشد با پیچشی حول محور مرکزی نانو فیبر همراه است که منجر به افزایش طول پیوندهای پپتیدی خصوصاً در لبه‌های نانو فیبر می‌شود. با مقایسه میزان جابه‌جایی موجود در طیف‌های CD هیدروژل‌های هم‌آرایی و خودآرایی و افزایش این

جابجایی در نمونه‌های حاصل از هم‌آرایی نسبت به خودآرایی می‌توان این‌گونه استنباط کرد که حضور مشتقات زیست‌فعال در فرآیند هم‌آرایی به دلیل وجود بخشهای زیست‌فعالشان احتمالاً منجر به ممانعت فضایی در سطح نانو فیبرها از نظر آرایش پهلوی به پهلوی آنها در طول نانو فیبر شده و منجر به قرارگیری این ساختارهای بتا با پیچشی در حول محور مرکزی نانو فیبرها می‌شود. بنابراین احتمالاً قطعه گم شده جورچین نوع چینش ساختارهای صفحات بتا بر روی نانو فیبرها است زیرا در عمل ایجاد پیچش مستلزم افزایش طول در پیوندهای هیدروژنی است که با جابه‌جایی باند آمیدی نوع A نیز مطابقت دارد. بنابراین همان‌طور که استاپ و همکاران اذعان داشته‌اند پیوندهای هیدروژنی نزدیک‌ترین اسیدآمینه‌ها به دم آلکیلی نقش بسیار مهمی در مقاومت مکانیکی هیدروژل حاصله دارند و مولکول‌های خود آراینده ممکن است توسط توالی‌های مختلف زیست‌فعالشان باعث تغییرات کوچکی در توپولوژی صفحات بتا شوند. تغییری که ممکن است اثرات توپولوژیکی آن طی فرآیند هم‌آرایی افزایش یافته و ریخت‌شناسی و خواص مکانیکی خود آرایه نهایی را تغییر دهد (۱۳). اما با توجه به این موضوع که رابطه مستقیمی میان افزایش طول پیوندهای هیدروژنی و کاهش قدرت آنها وجود دارد انتظار می‌رود مقاومت مکانیکی هیدروژل‌های هم‌آراینده نسبت به هیدروژل پپتید دوگانه دوست اول کمتر باشد اما این مشاهدات حاضر عکس آن را تأیید می‌کنند. در توجیه این مشاهدات می‌توان به این نکته اشاره کرد که مقاومت مکانیکی هیدروژل‌های نهایی تابعی از دو نوع میانکنش است. میانکنشهای درون فیبری که منجر به ساخت فیبرهای با مقاومت مطلوب می‌شود و میانکنشهای بین فیبری که منجر به اتصالات بین فیبرها شده و شبکه مستحکمی از نانو فیبرها را پدید می‌آورد (۶). با توجه به مستندات شکل ۲ در خودآرایی پپتید دوگانه دوست اول تنها میانکنش بین فیبری از نوع پل نمکی میان اسیدآمینه‌های گلوتامیک اسید است. اما در

ژئومتری میانکنشهایی که در سطح مولکولی رخ می‌دهد تعیین‌کننده ویژگی‌هایی نهایی هیدروژلهای حاصله است (۶ و ۲۲). و بنابراین با دست‌ورزی میانکنشها در این سطح می‌توان هیدروژلهایی با خواص زیستی و مکانیکی مطلوب برای کاربردهای پزشکی مختلف ایجاد کرد. به‌طور مثال با توجه به زیست‌فعال بودن پپتیدهای مشارکت‌کننده در تشکیل هیدروژلهای این پژوهش می‌توان آنها را برای کاربردهای مهندسی بافتهای نرم پیشنهاد کرد زیرا ضمن تأمین مؤلفه‌های زیستی لازم مقاومت مکانیکی این هیدروژلهای می‌تواند تداعی‌کننده این ویژگی در بافتهای نرم باشد.

### سپاسگزاری

این بررسی بدون مساعدتهای علمی و دوستانه خانم‌ها دکتر بهناز اشتری، شراره تودد و ندا سرای‌گرد افشاری و آقایان بهزاد ادیب، حسن بردانیا، رامین امیدوار و علیرضا نادری سہی این‌گونه به انجام نمی‌رسید.

حالت‌های هم‌آرایی ضمن تقویت این مؤلفه به دلیل حضور پپتید دوگانه دوست دوم میانکنشهای آب‌گریز نیز به‌واسطه پپتید دوگانه دوست سوم به مجموع میانکنشها افزوده می‌شود. بنابراین منطقی به نظر می‌رسد شبکه میانکنشهای بین فیبر غنی‌تر و قوی‌تری در هیدروژلهای ناشی از هم-آرایی نسبت به هیدروژل ناشی از خودآرایی پپتید دوگانه دوست اول برقرار باشد. ضمناً در پاسخ به این مسئله که چرا مقاومت مکانیکی هم‌آراییهای مختلف نیز با یکدیگر متفاوت است باید بار دیگر به دو مؤلفه میانکنشهای درون فیبری و بین فیبری مؤثر بر مقاومت مکانیکی هیدروژلهای اشاره کرد. همان‌طور که با توجه با داده‌های FTIR و CD مشهود است هم‌آراییهای اول، دوم و سوم به ترتیب از نظر طول پیوندهای هیدروژنی و در نتیجه میزان پیچش ساختارهای بتا حول محور مرکزی نانو فیبر در مراتب اول، دوم و سوم قرار گرفته‌اند و بنابراین منطقی به نظر می‌رسد از میان این سه هم‌آرایی، فیبرهای ایجادشده در هم‌آرایی سوم به ترتیب دارای پایداری بیشتری نسبت به هم‌آراییهای دوم و اول دارند. این مطالعه نشان داد نوع، قدرت و

### منابع

- Anderson, J.M., et al., Modulating the gelation properties of self-assembling peptide amphiphiles. *ACS nano*, 2009. 3(11): p. 3447-3454.
- Beniash, E., et al., Self-assembling peptide amphiphile nanofiber matrices for cell entrapment. *Acta biomaterialia*, 2005. 1(4): p. 387-397.
- Carvajal, D., et al., Physical properties of hierarchically ordered self-assembled planar and spherical membranes. *Soft Matter*, 2010. 6(8): p. 1816-1823.
- Cavalli, S., F. Albericio, and A. Kros, Amphiphilic peptides and their cross-disciplinary role as building blocks for nanoscience. *Chemical Society Reviews*, 2010. 39: (1) p. 241-263.
- Cui, H., M.J. Webber, and S.I. Stupp, Self-assembly of peptide amphiphiles: From molecules to nanostructures to biomaterials. *Peptide Science*, 2010. 94(1): p. 1-18.
- Dagdaz, Y.S., et al., Interfiber interactions alter the stiffness of gels formed by supramolecular self-assembled nanofibers. *Soft Matter*, 2011. 7(7): p. 3524-3532.
- Dehsorkhi, A., V. Castelletto, and I.W. Hamley, Self-assembling amphiphilic peptides. *Journal of Peptide Science*, 2014. 20(7): p. 453-467.
- Falvo D'Urso Labate, G.V.U., A Tissue Engineering product development pathway. 2012, Politecnico di Torino.
- Frydrych, M., et al., Biomimetic poly (glycerol sebacate)/poly (L-lactic acid) blend scaffolds for adipose tissue engineering. *Acta Biomaterialia*, 2015.
- Goktas, M., et al., Self-Assembled Peptide Amphiphile Nanofibers and PEG Composite Hydrogels as Tunable ECM Mimetic Microenvironment. *Biomacromolecules*, 2015.
- Hartgerink, J.D., E. Beniash, and S.I. Stupp, Peptide-amphiphile nanofibers: a versatile scaffold for the preparation of self-assembling

- materials. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2002. 99(8): p. 5133-5138.
12. Jing, J., et al., Type, density, and presentation of grafted adhesion peptides on polysaccharide based hydrogels control pre-osteoblast behavior and differentiation. *Biomacromolecules*, 2015.
  13. Jung, J.P., J.Z. Gasiorowski, and J.H. Collier, Fibrillar peptide gels in biotechnology and biomedicine. *Peptide Science*, 2010. 94(1): p. 49-59.
  14. Liu, J., et al., Self-Assembly-Peptide Hydrogels as Tissue-Engineering Scaffolds for Three-Dimensional Culture of Chondrocytes in vitro. *Macromolecular bioscience*, 2010. 10(10): p. 1164-1170.
  15. Mandal, B.B., et al., High-strength silk protein scaffolds for bone repair. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2012. 109(20): p. 7699-7704.
  16. Matson, J.B., R.H. Zha, and S.I. Stupp, Peptide self-assembly for crafting functional biological materials. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 2011. 15(6): p. 225-235.
  17. Miserez, A., J.C. Weaver, and O. Chaudhuri, Biological materials and molecular biomimetics—filling up the empty soft materials space for tissue engineering applications. *Journal of Materials Chemistry B*, 2015. 3(1): p. 13-24.
  18. Niece, K.L., et al., Modification of gelation kinetics in bioactive peptide amphiphiles. *Biomaterials*, 2008. 29(34): p. 4501-4509.
  19. Pashuck, E.T., H. Cui, and S.I. Stupp, Tuning supramolecular rigidity of peptide fibers through molecular structure. *Journal of the American Chemical Society*, 2010. 132(17): p. 6041-6046.
  20. Segers, V.F. and R.T. Lee, Local delivery of proteins and the use of self-assembling peptides. *Drug discovery today*, 2007. 12(13): p. 561-568.
  21. Steim, J.M. and S. Fleischer, Aggregation-induced red shift of the Cotton effect of mitochondrial structural protein. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1967. 58(4): p. 1292.
  22. Stendahl, J.C., et al., Intermolecular forces in the self-assembly of peptide amphiphile nanofibers. *Advanced Functional Materials*, 2006. 16(4): p. 499-508.
  23. Sur, S., et al., Epitope topography controls bioactivity in supramolecular nanofibers. *Biomaterials Science*, 2015.
  24. Velichko, Y.S., S.I. Stupp, and M.O. de la Cruz, Molecular simulation study of peptide amphiphile self-assembly. *The journal of physical chemistry B*, 2008. 112(8): p. 2326-2334.

## Design and synthesis of self-assembled peptide based on three dimensional nano hydrogels for soft tissue engineering

Roshani yasaghi E.<sup>1</sup>, Taghdir M.<sup>2</sup>, Shokrgozar M.A.<sup>3</sup> and Naderimanesh H.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Nanobiotechnology Dept., Faculty of Biological Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, I.R. of Iran

<sup>2</sup> Biophysics Dept., Faculty of Biological Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, I.R. of Iran

<sup>3</sup> Cell Bank Center, Pasture Institute, Tehran, I.R. of IRAN

### Abstract

Injectable hydrogels are among the most applicable materials in soft tissue engineering. Synthetic biology is been applied to design and produce new hydrogel biomaterials with suitable mechanical properties and in situ gel formation capability in in vivo conditions. Amphiphiles peptides are one mostly used group of these biomaterials. Biological, chemical and mechanical optimizations are necessary for a good soft tissue ECM simulation based on hydrogels. The aim of this work is to construct a novel three-dimensional nano-composite hydrogels with different mechanical and biological properties. The Spectroscopic and microscopic methods consisting of CD, FTIR, TEM, and AFM are used for optimization of the co-assembly process and to assess the probable effects of bio-epitope segments in final properties of co-assembled hydrogels. Our results show that not only the amount of each peptide but also hydrophobicity and the volume of bio-epitope segments affect the strength and geometry of hydrogen bonds, inter-febrile interactions, and final stability of hydrogels. These data suggest that it is possible to produce different hydrogels without major alterations in the main parts of peptide amphiphiles just by designing right combination of mixed peptide amphiphiles and their bio-derivatives.

**Key words:** amphiphile peptide, self-assembly, co-assembly, nano-fiber, mechanical properties