

## Study of hBMSC Adhesion and Proliferation on RGD-modified Polycaprolactone/Gelatin Nanofibrous Scaffold

Ali Mota<sup>1</sup>, Abbas Sahebghadam Lotfi<sup>2\*</sup>, Jalal Barzin<sup>3</sup>, Mohammad Massumi<sup>4</sup>, Mostafa Hatam<sup>4</sup>, Behzad Adibi<sup>1</sup>

1- Ph.D. Candidate., Department of Clinical Biochemistry, Faculty of Medical Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- Professor, Department of Clinical Biochemistry, Faculty of Medical Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

3- Associated Professor, Iran Polymer and Petrochemical Institute (IPPI), Tehran, Iran

4- Assistant Professor, National Institute of Genetic Engineering and Biotechnology (NIGEB), Tehran, Iran

\*Corresponding Address: P.O.Code: 1411713116, Department of Clinical Biochemistry, Faculty of Medical Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran  
Email: lotfi\_ab@modares.ac.ir

Received: 12/Dec/2012, Accepted: 07/May/2013

### Abstract

**Objective:** In this study we introduced an RGD-containing peptide of collagen IV origin that possesses potent cell adhesion and proliferation properties. This peptide was immobilized on a nanofibrous polycaprolactone/gelatin scaffold after which we analyzed human bone marrow-derived mesenchymal stem cells (hBMSCs) adhesion and proliferation on this peptide-modified scaffold.

**Methods:** Nanofibrous scaffold was prepared by electrospinning. The peptide was synthesized by solid-phase peptide synthesis and immobilized on electrospun nanofibrous a polycaprolactone/gelatin scaffold by chemical bonding. Native and modified scaffolds were characterized with Scanning Electron Microscope (SEM) and Fourier-Transform Infra-red Spectroscopy (FTIR). Adhesion and proliferation of hBMSCs on native and modified scaffolds were analyzed by the Methylthiazol Tetrazolium (MTT) assay.

**Results:** SEM images showed that electrospun scaffolds had homogenous morphology and were  $312 \pm 89$  nm in diameter. There was no significant difference in scaffold morphology before and after peptide immobilization. FTIR results showed that the peptide was successfully immobilized on the scaffold. Based on MTT assay, cell adhesion studies indicated that peptide immobilization improved cell adhesion on RGD-modified scaffolds at all corresponding time points ( $p < 0.05$ ). RGD immobilization led to increased cell proliferation potential of the scaffold compared with tissue culture plate and native scaffold ( $P < 0.05$ ).

**Conclusion:** This novel peptide and modified nanofibrous scaffold, having improved cell adhesion and proliferation properties, can be used for tissue engineering and regenerative medicine by using hBMSCs.

**Keywords:** Mesenchymal stem cell, Nanofiber, RGD peptide, Scaffold

Modares Journal of Medical Sciences: *Pathobiology*, Vol 16, No 1, Spring 2013, Pages: 75-87

# مطالعه چسبندگی و تکثیر سلول بنیادی مزانشیمی مغز استخوان انسانی روی داربست نانوفیبری پلی کاپرولاکتون / ژلاتین تغییر داده شده با پپتید RGD

علی مطاع<sup>۱</sup>، عباس صاحبقدم‌لطفی<sup>۲\*</sup>، جلال برزین<sup>۳</sup>، محمد معصومی<sup>۴</sup>، مصطفی حاتم<sup>۴</sup>، بهزاد ادیبی<sup>۱</sup>

- ۱- دانشجوی دکتری تخصصی، گروه بیوشیمی بالینی، دانشکده علوم پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
- ۲- استاد، گروه بیوشیمی بالینی، دانشکده علوم پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
- ۳- دانشیار، گروه زیست-مواد، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی، تهران، ایران
- ۴- استادیار، پژوهشگاه ملی مهندسی ژنتیک و زیست فناوری، تهران، ایران

\*آدرس نویسنده مسئول: ایران، تهران، کدپستی: ۱۴۱۱۷۱۳۱۱۶، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده علوم پزشکی، گروه بیوشیمی بالینی  
Email: lotfi\_ab@modares.ac.ir

پذیرش مقاله: ۹۲/۰۲/۱۷

دریافت مقاله: ۹۱/۰۹/۲۱

## چکیده

**هدف:** در این مطالعه پپتیدی حاوی توالی RGD از منشأ کلاژن IV معرفی شده است که دارای خصوصیات چسبندگی و تکثیری است. این پپتید روی داربست نانوفیبری پلی کاپرولاکتون/ژلاتین تثبیت شد و چسبندگی و تکثیر سلول‌های بنیادی مزانشیمی مغز استخوان انسانی روی داربست تغییر داده شده توسط پپتید بررسی شد.

**مواد و روش‌ها:** داربست نانوفیبری پلی کاپرولاکتون/ژلاتین توسط الکتروریسی سنتز و پپتید مورد نظر توسط روش سنتز پپتید در فاز جامد ساخته شد. این پپتید توسط پیوند شیمیایی روی داربست پلی کاپرولاکتون/ژلاتین تثبیت شد. داربست‌های طبیعی و تغییر یافته توسط میکروسکوپ الکترونی نگاره و طیف مادون قرمز بررسی شد. چسبندگی و تکثیر سلول‌های بنیادی مزانشیمی مغز استخوان انسانی روی داربست طبیعی و داربست تغییر داده شده توسط آزمون MTT بررسی شد.

**نتایج:** تصاویر میکروسکوپ الکترونی نگاره نشان داد که داربست‌های نانوفیبری الکتروریسی شده دارای ریخت‌شناسی یکنواخت با قطر  $190 \pm 38$  نانومتر است. تغییر معنی‌داری در ریخت‌شناسی داربست قبل و بعد از تثبیت پپتید مشاهده نشد. نتایج طیف مادون قرمز نشان داد که پپتید با موفقیت روی داربست تثبیت شده است. براساس نتایج MTT مطالعات سلولی نشان داد که تثبیت پپتید روی داربست، چسبندگی سلول به داربست را در تمام زمان‌های مطالعه شده بهبود می‌بخشد. همچنین نشان داده شد که تثبیت پپتید منجر به افزایش قدرت تکثیر سلول‌ها روی داربست فعال شده با پپتید در مقایسه با داربست طبیعی و پلیت کشت سلولی می‌شود.

**نتیجه‌گیری:** پپتید RGD ساخته شده و تثبیت شده روی داربست نانوفیبری می‌تواند در کاربردهای مختلفی که نیاز به چسبندگی سلولی است استفاده شود و همچنین داربست ساخته شده و فعال شده با پپتید مورد نظر را می‌توان در مهندسی بافت مورد استفاده قرار داد.

کلیدواژگان: سلول بنیادی مزانشیمی، پپتید RGD، نانوفیبر، داربست

مجله علوم پزشکی مدرس: آسیب‌شناسی زیستی، دوره ۱۶، شماره ۱، بهار ۱۳۹۲، صفحات: ۷۵-۸۷

در سال‌های اخیر محدوده وسیعی از مواد پلیمری زیستی (Biomaterials) با خصوصیات متعدد برای مهندسی زیستی و مهندسی بافت استفاده شده است. این زیست-مواد باید دارای خصوصیات زیست-تخریب‌پذیری (Biodegradability)، زیست-سازگاری (Biocompatibility) و زیست-فعالی (Bioactivity) مناسبی باشد [۱]. داربست ماتریکس خارج سلولی از مولکول‌های ساختاری و عملکردی همانند پروتئین‌های کلاژن (Collagen)، فیبرونکتین (Fibronectin)، لامینین (Laminin) و پروتئوگلیکان‌ها (Proteoglycan) ساخته شده است. این ماتریکس توسط سلول‌های موجود در هر بافتی ساخته و ترشح می‌شود. ترکیب ماتریکس خارج سلولی تأثیر چشمگیری بر رفتار سلولی مانند رشد، تکثیر، بقا، تمایز، مهاجرت و چسبندگی سلولی دارد؛ به همین دلیل استفاده از ماکرومولکول‌های ماتریکس خارج سلولی در مطالعات سلولی و ساخت زیست-مواد بسیار کاربرد دارد. ساختار زیست-مواد نیز دارای اهمیت خاصی بوده و بر میانگینش بین سلول و ماتریکس خارج سلولی تأثیر دارد [۲]. میانگینش بین سلول و ماتریکس در رفتارهای سلولی مانند چسبندگی، تکثیر و تمایز اهمیت دارد [۳]. چسبندگی سلولی اولین رویداد در پاسخ سلول به زیست ماده است [۴]. بسیاری از این زیست مواد دارای خصوصیات زیست-تخریب‌پذیری مناسب و خصوصیات مکانیکی قابل قبول هستند [۵]. یکی از موارد چالش‌زا در مورد زیست-مواد پلیمری مانند پلی کاپرولاکتون در کاربردهای زیست پزشکی این است که خصوصیات زیست-فعالی و زیست-مقلدی (Biomimetic) لازم برای میانگینش با سلول کشت شده را ندارد [۶]. راه‌کارهایی که می‌توان با استفاده از آن‌ها خصوصیات زیست-مقلدی چنین زیست موادی را بهبود بخشید، شامل تغییر این مواد با هیبرید کردن آن‌ها با ترکیبات زیست-فعال یا تثبیت موتیف‌های (Motifs) زیست فعال برای افزایش و کنترل میانگینش بین سلول‌ها و زیست-مواد صناعی است [۷].

## داربست نانوفیبری تغییر داده شده توسط پیپتید RGD

الکتروریسی (Electrospinning) یک روش ساده با بازده بالا برای تولید نانوفیبرهای هیبرید با تخلخل بالا و سطح تماس بالا برای تقلید از الگوی نانوی ماتریکس خارج سلولی برای کنترل رفتار سلولی است [۲]. در سال‌های اخیر کوشش‌های فراوان منجر به تولید داربست‌های نانوفیبری پلیمری با استفاده از الکتروریسی برای کاربردهای زیست-پزشکی شده است [۸، ۹]. هیبرید کردن زیست مواد با ترکیبات زیست-فعالی مانند ژلاتین (Gelatin) [۱۰، ۱۱]، کلاژن [۱۲، ۱۳]، فیبروین (Fibroin) [۱۴] در بسیاری از مطالعات برای تعدیل خصوصیات زیست-تقلیدی مواد پلیمری برای بسیاری از کاربردها استفاده شده است. تثبیت پیپتیدهای شناساگر سلول روی زیست-مواد [۱۵، ۱۶] یا آمفی‌فیل‌های (Amphiphile) پیپتیدی [۱۷، ۱۸] شیمی سطح زیست-مواد را بهبود بخشیده است. میانگینش‌های سلول-سلول و سلول-ماتریکس به واسطه گیرنده‌های چسبندگی سلولی انجام می‌شود. خانواده اینتگرین (Integrin) در بین وسیع‌ترین گروه‌ها در گیرنده‌های سلولی قرار دارد. این گیرنده‌ها نه تنها در اتصال سلول بلکه در بسیاری از فرآیندهای دیگر همانند تکثیر، تمایز، هوموستاز (Homeostasis) و غیره دخالت دارد [۱۹]. توالی RGD یکی از توالی‌های غالب شناساگر سلولی است که در بسیاری از پروتئین‌های ماتریکس خارج سلولی وجود دارد [۲۰]. نشان داده شده است که تقریباً نیمی از خانواده اینتگرین‌ها از طریق توالی RGD به پروتئین‌های ماتریکس متصل می‌شود. بنابراین پیپتیدهای RGD یکی مؤثرترین پیپتیدها برای بهبود چسبندگی سلولی به سطح زیست-مواد است.

در این مطالعه یک پیپتید RGD جدید از منشأ کلاژن نوع IV معرفی و این پیپتید روی سطح داربست نانوفیبری PCL/Gelatin Nanofibrous) Polycaprolactone/Scaffold) تثبیت شده است. ساختار و ریخت‌شناسی (Morphology) نانوفیبرها توسط میکروسکوپ الکترونی نگاره (Scanning Electron Microscope: SEM) ارزیابی و داربست تغییر داده شده توسط طیف سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) تغییر داده شده است.

FTIR) بررسی شده است. همچنین چسبندگی و تکثیر سلول‌های بنیادی مزانشیمی مغز استخوان روی داربست مطالعه شده است.

## مواد و روش‌ها

### ساخت داربست

برای ساخت داربست هیبرید نانوفیبری پلی کاپرولاکتون/ژلاتین (PCL/Gel) از روش الکتروریسی استفاده شد. برای این کار ابتدا محلول ۱۰ درصد وزنی/حجمی از PCL گرانوله و Gel پودری در حلال تری فلورواتانول (Tetrafluoroethanol) (TFE) به صورت جداگانه تهیه شد. به این منظور هرکدام از این مواد با حلال مخلوط شده و به مدت ۲۴ ساعت در حرارت آزمایشگاه مخلوط شد. پس از آن محلول‌های همگن به نسبت ۱ به ۱ با هم مخلوط شده و محلول حاصل برای الکترواسپین تهیه شد.

به منظور الکتروریسی، محلول PCL/Gel در درون سرنگ ۱۰ میلی‌لیتری با سر سوزن شماره ۲۰ ریخته شد و در دستگاه الکتروریسی قرار داده شد. الکتروریسی با ولتاژ ۲۵ کیلوولت انجام شد. نانوفیبرها روی جمع‌کننده استوانه‌ای چرخان که در فاصله ۱۵ سانتی‌متری از سر سوزن قرار داشت و روی آن صفحه آلومینیومی کشیده شده بود، جمع‌آوری شد. سرعت چرخش جمع‌کننده ۲۵۰ دور در دقیقه بود.

پس از سنتز اولیه نانوفیبرها نمونه‌ای از آن به منظور بررسی سنتز نانوفیبرها برای تهیه تصاویر SEM تهیه شد. پس از تهیه تصاویر SEM، سنتز مجدد نانوفیبرها ادامه یافت تا ضخامت نانوفیبرها به اندازه مورد نظر برسد.

### سنتز پپتید حاوی توالی RGD

برای سنتز پپتید حاوی توالی RGD از روش سنتز پپتید در فاز جامد استفاده شد. در این مطالعه پپتید روی بستر جامد Rink-amide-MBHA با ظرفیت بارگیری تئوری ۰/۵۵ میلی‌مول بر گرم سنتز شد. تمام محاسبات سنتز پپتید

براساس ظرفیت بارگیری تئوری انجام شد. در مرحله سنتز پپتید از اسیدهای آمینه استاندارد که دارای گروه‌های محافظ مناسب بود استفاده شد. در هر مرحله به مقدار ۴ اکی‌مولار ظرفیت بارگیری از اسید آمینه مورد نظر استفاده شد. برای برداشت گروه‌های محافظ در هر مرحله از پپیریدین (Piperidine) ۲۰ درصد در دی متیل فرمامید استفاده شد. برای اتصال هر اسید آمینه در هر مرحله از معرف اتصالی HBTU (O-Benzotriazole-N, N, N', N'-tetramethyl-uronium-) (hexafluoro-phosphate) به میزان ۹۸ درصد بارگیری کل و دی ایزوپروپیل اتیل آمین (N,N-Diisopropylethylamine) ۲/۵ اکی‌مولار بارگیری کل استفاده شد. برای بررسی اتصال اسید آمینه و همچنین بررسی برداشت گروه‌های محافظتی در هر مرحله آزمون کایزر (Kaiser Test) به کار رفت. به این منظور پس از هر مرحله اتصال اسید آمینه و برداشت گروه محافظتی، مقداری از رزین برداشته شد و بعد از شستشو با ایزوپروپانول، چند قطره محلول کایزر به رزین اضافه شد و به مدت ۲ دقیقه در دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد انکوبه شد. پس از سنتز پپتید در فاز جامد روی رزین مورد نظر، رزین توسط متانول خالص ۲ بار شستشو و در خلأ خشک شد. پس از خشک شدن، پپتید سنتز شده توسط تری فلورواستیک اسید (Trifluoroacetic Acid) ۹۵ درصد، تری ایزوپروپیل سیلان (Triisopropylsilane) ۲/۵ درصد و آب مقطر ۲/۵ درصد به مدت ۲ ساعت از رزین جامد جدا شد و با استفاده از دی اتیل اتر سرد رسوب داده شد. پس از رسوب‌گیری و شستشو، پپتید سنتز شده در مقداری آب حل شده و لیوفیلیزه (Lyophilised) شد. میزان خلوص و کیفیت پپتید سنتز شده توسط کروماتوگرافی HPLC (High-Performance Liquid Chromatography) آنالیزی با ستون C18 توسط گرادیان فاز متحرک آب و استونیتریل (Acetonitrile) بررسی شد. سپس پپتید سنتز شده، براساس روش به دست آمده از کروماتوگرافی آنالیزی توسط کروماتوگرافی با مقیاس بالا خالص سازی شد. برای بررسی خلوص پپتید به دست آمده دوباره از HPLC آنالیزی استفاده

## داربست نانوفیبری تغییر داده شده توسط پپتید RGD

در حرارت آزمایشگاه انکوبه شد. پس از انجام واکنش اتصال، داربست در خلأ خشک شد.

## تأیید تثبیت پپتید روی داربست

برای تأیید تثبیت پپتید روی نانوفیبرها آزمون FTIR انجام شد. به این منظور طیف مادون قرمز قطعه کوچکی از داربست فعال شده در محدوده ۶۰۰ تا  $4000\text{ cm}^{-1}$  گرفته شده و وجود پیوندهای C-I کششی در محدوده ۸۰۰ بررسی شد.

## بررسی‌های ریخت‌شناختی (SEM)

تصاویر SEM برای بررسی سنتز داربست نانوفیبری و بررسی شکل ظاهری داربست قبل و بعد از تثبیت پپتید تهیه شد. به این منظور این داربست‌ها با طلا پوشش داده شد و تصاویر SEM با ولتاژ ۱۰ کیلو ولت تهیه شد. قطر فیبرها با استفاده از نرم‌افزار پردازش تصویر (Image J، آمریکا) بررسی شد.

## مطالعات سلولی

برای بررسی تأثیر تثبیت پپتید روی داربست بر چسبندگی سلولی و همچنین تکثیر سلولی، سلول‌های مزانشیمی مغز استخوان انسانی (Human Bone Marrow Stem Cells: hBMSC) روی داربست‌های مورد نظر کشت داده شدند. به منظور بررسی چسبندگی سلولی، داربست نانوفیبری فعال نشده و فعال شده با پپتید به وسیله پانچ به اندازه چاهک‌های پلیت ۹۶ خانه بریده شد. قبل از انجام آزمون چسبندگی داربست نانوفیبری توسط اتانول ۷۰ درصد به مدت ۳۰ دقیقه استریل شد و پس از آن داربست‌های بریده شده به دقت داخل چاهک‌های پلیت گذاشته شد و توسط نور فرابنفش به مدت ۱۵ دقیقه دیگر استریل شد. پس از تهیه سوسپانسیون سلولی سلول‌های مزانشیمی، تعداد ۵۰۰۰ سلول به هر چاهک اضافه شد. آزمون MTT برای بررسی چسبندگی سلولی، ۱، ۲، ۳ و ۴ ساعت پس از اضافه کردن سلول‌ها انجام شد. به این منظور پس از گذشت

شد و همچنین برای بررسی درستی سنتز پپتید، از طیف سنجی کروماتوگرافی مایع-اسپکترومتری جرمی (Liquid Chromatography-Mass Spectrometry: LC-MS) استفاده شد.

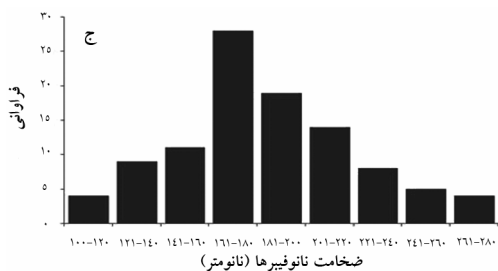
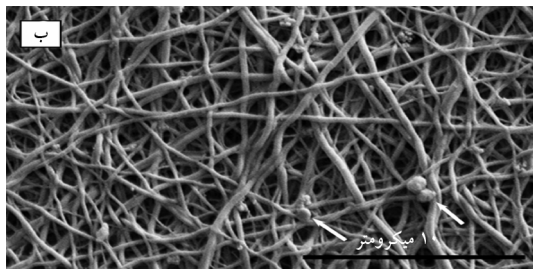
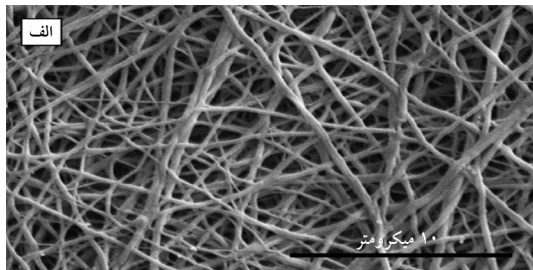
## ایجاد اتصالات متقاطع در داربست هیبرید نانوفیبری

برای پایدارسازی نانوفیبرها، اتصال متقاطع بین آن‌ها ایجاد شد. در این مطالعه برای ایجاد پیوندهای متقاطع بین نانوفیبرها از کربودی ایمید (Carbodiimide) محلول در آب N-اتیل دی کربودی ایمید (N-Ethylcarbodiimide: EDC) و N-هیدروکسی سوکسینیمید (N-Hydroxysuccinimide: NHS) استفاده شد. این ماده برای ایجاد اتصال متقاطع مناسب است زیرا نوعی پیوند ایجاد می‌کند که شبیه پیوندهای موجود در پروتئین‌ها در رشته‌های ژلاتین است.

برای ایجاد اتصال متقاطع، ابتدا محلول ۲۵۰ میلی‌مولار EDC و ۱۰۰ میلی‌مولار NHS ساخته شد. داربست نانوفیبری مورد نظر به مدت ۱ ساعت در این محلول قرار داده شد. پس از این مدت با استفاده از آزمون نینهدرین (Ninhydrin Test) واکنش اتصال متقاطع بررسی شد. پس از آن قسمتی از داربست نانوفیبری در محیط خلأ خشک شد و از آن تصویر SEM تهیه شد و باقیمانده داربست بدون انجام هیچ تیماری در مرحله بعد استفاده شد.

## تثبیت پپتید روی داربست

برای افزایش خواص اتصال سلول به نانوفیبرها پپتید سنتز شده دارای توالی RGD روی نانوفیبرها تثبیت شد. به همین منظور دوباره از ترکیبات جفت کننده گروه‌های کربوکسیل و آمین استفاده شد. ابتدا داربست نانوفیبری در اندازه‌های بریده شده تحت تأثیر EDC و NHS قرار گرفت. پس از شستشو، داربست مورد نظر در محلول حاوی پپتید با غلظت ۱ میکرومول در هر میلی‌لیتر قرار داده شد و به مدت ۲۴ ساعت



شکل ۱ تصاویر SEM مربوط به ریخت‌شناسی نانوفیبرها (الف) قبل و (ب) بعد از تثبیت پپتید روی داربست؛ همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، تغییر محسوسی در شکل و ریخت‌شناسی نانوفیبرها پس از ایجاد اتصال متقاطع و تثبیت پپتید مشاهده نمی‌شود. (ج) توزیع اندازه نانوفیبرها که توسط نرم‌افزار پردازش تصویر Image J بررسی شده است. خط مقیاس: ۱۰ میکرومتر

### ساخت پپتید حاوی توالی RGD

پپتید حاوی توالی RGD با توالی 4-FGGPRGDKK (KKGPRGDPG-F(4)) با جرم مولکولی تئوریک تقریباً ۱۱۸۳ با موفقیت ساخته شد. پس از سنتز پپتید خام، خلوص آن با HPLC آنالیزی بررسی شد (شکل ۲). پس از ارزیابی اولیه توسط کروماتوگرافی، برای خلوص‌سازی پپتید از کروماتوگرافی تولیدی با مقیاس بالا (سیستم کروماتوگرافی Agilent 1260) استفاده شد. پس از انجام خلوص‌سازی دوباره کروماتوگرافی آنالیزی انجام شد که خلوص پپتید بیش از ۹۵ درصد به دست آمد (شکل ۲). برای

زمان مذکور محیط کشت داخل چاهک‌ها خارج شد و محیط کشت حاوی ۱۰ درصد نمک MTT به هر چاهک اضافه شد و پلیت به مدت ۴ ساعت در انکوباتور انکوبه شد. پس از آن محیط کشت خارج شده و به میزان ۱۰۰ میکرولیتر DMSO (Dimethyl sulfoxide) به هر چاهک اضافه شد. پس از ۱۵ دقیقه میزان جذب نوری هر چاهک در طول موج ۵۷۰ نانومتر سنجیده شد.

### تجزیه و تحلیل آماری

تجزیه و تحلیل آماری توسط نرم‌افزار SPSS نسخه ۱۷ انجام شد. تمام آزمایش‌های کشت سلولی به صورت سه تکراری انجام شد. مقادیر میانگین و انحراف معیار از میانگین برای تجزیه و تحلیل داده‌های چسبندگی و تکثیر سلولی استفاده شد. برای مقایسه مقادیر میانگین در داربست‌های مختلف آزمون آنالیز واریانس یک طرفه (One-way Analysis of Variance: ANOVA) به کار رفت. مقادیر P کمتر از ۰/۰۵ با فاصله اطمینان ۹۵ درصد از لحاظ آماری معنی‌دار در نظر گرفته شد.

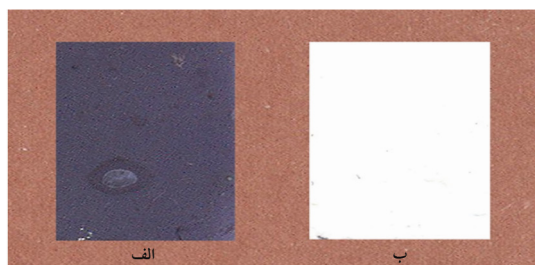
### نتایج

#### ساخت داربست و بررسی‌های ریخت‌شناختی (SEM)

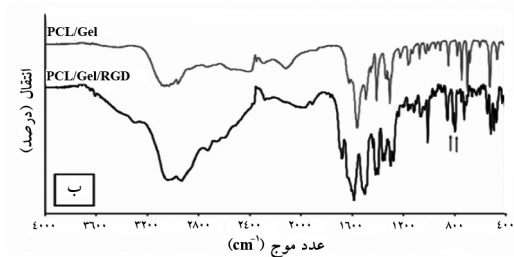
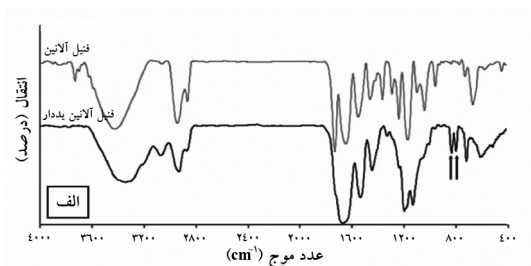
داربست هیبرید نانوفیبری PCL/Gel با موفقیت ساخته شد. نانوفیبرهای ساخته شده شکل یکنواختی داشت و هیچ دانه‌ای در طول نانوفیبرها مشاهده نشد. همچنین قطر نانوفیبرها نیز یکنواخت و اندازه آن‌ها  $38 \pm 190$  نانومتر بود (شکل ۱ الف). برای افزایش مقاومت مکانیکی و همچنین جلوگیری از آب‌گیری ژلاتین در داربست نانوفیبری، در این داربست اتصالات متقاطع ایجاد شد. نتایج نشان داد که ریخت‌شناسی نانوفیبرها پس از ایجاد اتصالات متقاطع تغییر قابل توجهی نداشت و اندازه نانوفیبرها تقریباً ثابت بود (شکل ۱ ب).

## داربست نانوفیبری تغییر داده شده توسط پپتید RGD

اتصالات متقاطع داربست آزمون نینهیدرین منفی بوده و داربست به رنگ سفید مشاهده می شود (شکل ۳).



شکل ۳ آزمون نینهیدرین برای بررسی ایجاد اتصالات متقاطع (الف) قبل و (ب) بعد از ایجاد اتصالات متقاطع؛ قبل از ایجاد اتصال متقاطع گروه های آمین موجود در داربست آزاد بوده و با نینهیدرین واکنش می دهد که ایجاد رنگ می کند در صورتی که پس از ایجاد اتصال متقاطع گروه های آمین آزاد نبوده و واکنشی صورت نمی گیرد.

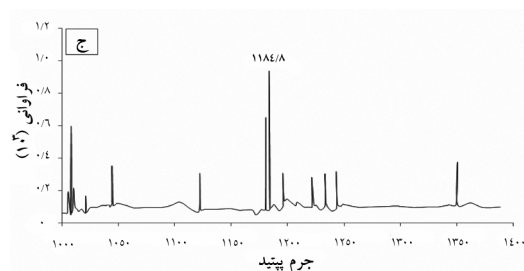
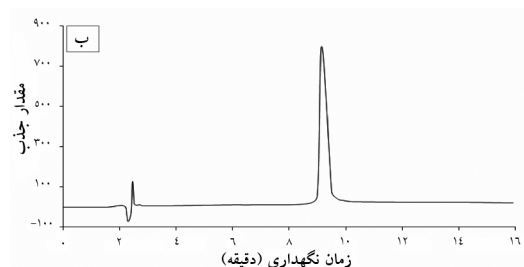
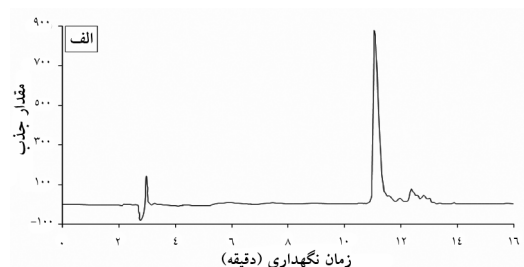


شکل ۴ (الف) طیف FTIR مربوط به استانداردهای فنیل آلانین و فنیل آلانین بدار که در فنیل آلانین بدار قله مربوط به پیوندهایی کششی C-I در ناحیه نزدیک  $800\text{ cm}^{-1}$  کاملاً مشخص است. (ب) طیف FTIR مربوط به داربست های PCL/Gel و PCL/Gel فعال شده با RGD. که قله مربوط به پیوندهای کششی C-I در ناحیه نزدیک  $800\text{ cm}^{-1}$  کاملاً مشهود است.

## تأیید تثبیت پپتید

نتایج FTIR برای تأیید تثبیت پپتید روی داربست در شکل

تأیید درستی ساخت پپتید نیز اسپکترومتری جرمی (LC-MS) انجام شد. نتایج MS یک قله (Peak) واضح در ناحیه  $1184/8$  نشان داد که درستی ساخت پپتید را تأیید می کند (شکل ۲).



شکل ۲ کروماتوگرام مربوط به (الف) پپتید خام و (ب) پپتید خالص شده. پس از خالص سازی توسط کروماتوگرافی تهیه ای، ناخالصی های موجود در محصول پپتید خام برطرف شده و خلوص پپتید به بیش از ۹۸ درصد رسید. (ج) طیف اسپکترومتری جرمی مربوط به پپتید ساخته شده که قله مربوط به جرم پپتید  $1184$  در  $(m/z)$  مشخص است.

## ایجاد اتصالات متقاطع در داربست هیبرید نانوفیبری

در بررسی ایجاد اتصالات متقاطع در داربست از آزمون نینهیدرین کیفی استفاده شد. همان طور که مشاهده می شود آزمون نینهیدرین قبل از ایجاد اتصالات متقاطع مثبت بوده و داربست به رنگ بنفش در آمده است ولی پس از ایجاد

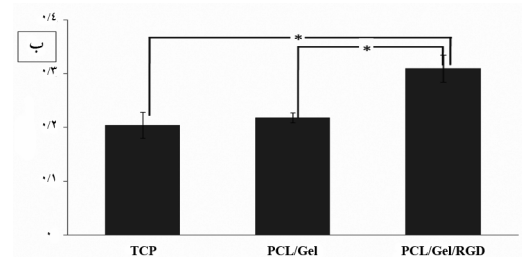
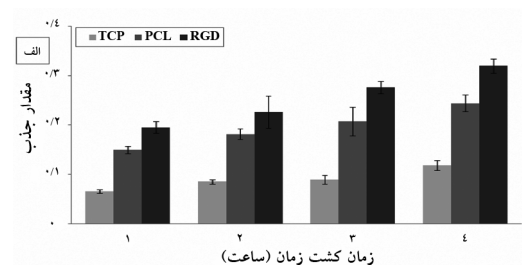
هر چه اتصال بیشتر باشد، شدت رنگ ایجاد شده نیز بیشتر است. همان‌طور که در نمودار شکل ۵ نشان داده شده است، شدت رنگ ایجاد شده در داربست فعال شده با پپتید در تمام زمان‌های مورد نظر بیشتر از داربست فعال نشده و پلیت کشت سلولی است ( $P < 0/05$ ). این شکل نشان می‌دهد که چسبندگی سلولی روی پلیت کشت سلولی در زمان‌های مختلف تفاوت چندانی ندارد ولی چسبندگی سلولی روی داربست PCL/Gel و همچنین PCL/Gel فعال شده با پپتید با گذشت زمان حالت پیشرونده‌ای دارد. این نتایج همچنین نشان می‌دهد که میزان چسبندگی سلول به داربست فعال شده با پپتید بسیار بیشتر از دو گروه دیگر است ( $P < 0/05$ ). نتایج آزمون تکثیر سلولی پس از کشت سلول‌ها به مدت ۷۲ ساعت نیز نشان داد که میزان تکثیر سلول‌ها روی داربست فعال شده با پپتید بسیار بیشتر از پلیت کشت سلولی و داربست فعال نشده است ( $P < 0/05$ ).

## بحث

در این مطالعه پپتید حاوی توالی RGD مشتق از کلاژن IV که دارای خصوصیات چسبندگی و تکثیر سلولی است، ساخته شد. این پپتید به طور موفقیت‌آمیزی بر روی داربست هیبرید نانوفیبری PCL/Gel تثبیت شد. تثبیت پپتید با استفاده از پیوند شیمیایی و بدون تیمار شیمیایی پس از ایجاد اتصالات متقاطع انجام شد تا چسبندگی hBMSC به داربست افزایش یافته و خاصیت تقلید زیستی داربست بهبود یابد.

ماتریکس خارج سلولی از ماکرومولکول‌های مختلفی تشکیل شده است که پروتئین‌های کلاژن، لامینین و فیبرونکتین جزو فراوان‌ترین این پروتئین‌ها محسوب می‌شود. این پروتئین‌ها نقش ساختاری و عملکردی داشته و تأثیر مستقیمی بر اکثر رفتارهای سلولی همانند رشد، تکثیر، مهاجرت و تمایز دارد. استفاده از این مولکول‌های پروتئینی در مطالعات مهندسی بافت بسیار مورد توجه قرار گرفته است. با این حال به دلیل عدم دسترسی و هزینه بالا، استفاده از آن‌ها بسیار محدود است. به این دلیل استفاده از توالی‌های موجود در این پروتئین‌ها که

۴ نشان داده شده است. برای تأیید تثبیت پپتید از طیف استاندارد فنیل آلانین و فنیل آلانین یید دار استفاده شد. در طیف فنیل آلانین یید دار دو قله مشخص در  $798 \text{ cm}^{-1}$  و  $812 \text{ cm}^{-1}$  به وضوح قابل مشاهده است که این دو قله را می‌توان به حضور یید در مولکول فنیل آلانین یید دار نسبت داد. این دو قله در طیف FTIR مربوط به داربست PCL/Gel وجود ندارد ولی در طیف مربوط به داربست فعال شده با پپتید، قله اول در ناحیه  $798 \text{ cm}^{-1}$  قابل مشاهده است. قله دوم نیز با کمی جابه‌جایی در ناحیه  $840 \text{ cm}^{-1}$  به وضوح قابل مشاهده است.



شکل ۵ (الف) نمودار مربوط به آزمون MTT برای بررسی چسبندگی سلولی پس از کشت سلول‌های MSC روی داربست‌های PCL/Gel و PCL/Gel فعال شده با پپتید در زمان‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ ساعت، (ب) نمودار مربوط به آزمون MTT برای بررسی تکثیر سلولی پس از کشت سلول‌های MSC روی داربست‌های PCL/Gel و PCL/Gel فعال شده با پپتید پس از ۷۲ ساعت، میزان چسبندگی ( $P < 0/05$ ) و تکثیر ( $P < 0/05$ ) سلول‌ها روی داربست فعال شده به وضوح بسیار بیشتر از داربست فعال نشده و پلیت کشت سلول است.

## مطالعات سلولی

نتایج آزمون MTT (4,5-dimethylthiazol-2-yl)- (2, 5-diphenyl tetrazolium bromide) در شکل ۵ نشان داده شده است. در این آزمون، شدت رنگ تولید شده ارتباط مستقیم با تعداد سلول‌های زنده اتصال یافته به داربست دارد.



## داربست نانوفیبری تغییر داده شده توسط پیپتید RGD

بازسازی عروق استفاده شده است. تیلمن (Tillman) و همکاران نشان داده‌اند که داربست‌های PCL/Col دارای قدرت و یکپارچگی بالایی در داخل بدن بوده و پاسخ ایمنی غیرطبیعی ایجاد نمی‌کند. این محققین چنین نتیجه گرفته‌اند که این داربست‌ها می‌تواند در موارد بالینی به کار برده شود [۲۵]. مک‌کلور (McClure) و همکاران از یک ماتریکس سه لایه برای تقلید از ساختار طبیعی رگ با استفاده از PCL، الاستین و کلاژن استفاده کرده‌اند. آن‌ها نتیجه گرفته‌اند که این پیوند سه لایه عروقی دارای خصوصیات کلی سرخرگ طبیعی است [۲۶]. ژلاتین به عنوان شکل واسرشت شده کلاژن در بسیاری از داربست‌های زیست-تخریب پذیر استفاده شده است. یکی از معایب ژلاتین به صورت ساده یا در ترکیب با سایر زیست-مواد، آب‌گیری آن در محیط آبی است. برای حل این مشکل می‌توان با استفاده از اتصال دهنده‌های شیمیایی مانند گلووتارآلدید (Glutaraldehyde) و فرمالدئید (Formaldehyde) در ژلاتین اتصال متقاطع ایجاد کرد. با این حال نشان داده شده است که این اتصال دهنده‌ها در مقادیر بالا سمی هستند [۲۷] و ریخت‌شناسی داربست را نیز به هم می‌ریزند [۲۳]. EDC یک اتصال دهنده مؤثر است و پیوندهایی را ایجاد می‌کند که محصول جانبی غیر سمی داشته و پیوند خارجی در ژلاتین ایجاد نمی‌کند. نشان داده شده است که EDC به عنوان یک کربودی ایمید محلول در آب می‌تواند برای ایجاد اتصال متقاطع در ژلاتین استفاده شود. این ماده وقتی به صورت ترکیبی با اتانول استفاده شود از آب‌گیری ژلاتین حتی در فرآیند ایجاد اتصال متقاطع جلوگیری می‌شود.

ایجاد اتصال متقاطع در داربست توسط EDC مستلزم فعال شدن گروه کربوکسیل انتهای کربوکسیل، گروه کربوکسیل زنجیره جانبی آسپاراتات و گلوتامات و تشکیل پیوند آمیدی و جفت شدن آن‌ها با گروه آمین لیزین است. در حقیقت EDC/NHS باعث تشکیل اتصالات متقاطع داخل مولکولی و بین مولکولی در ژلاتین می‌شود [۲۳]. گروور (Grover) و همکاران نشان داده‌اند که ایجاد اتصالات متقاطع در داربست‌های ژلاتینی می‌تواند استحکام مکانیکی آن را بهبود

خاصیت چسبندگی دارد، بسیار متداول شده است.

ریخت‌شناسی و شیمی سطح داربست‌های مورد استفاده در مهندسی بافت و پزشکی بازیابی نیز تأثیر مهمی بر رفتار سلولی مانند چسبندگی، تکثیر، تمایز و میانکنش سلول با ماتریکس خارج سلولی دارد [۲۱]. یکی از موارد چالش‌زا در ارتباط با مواد پلیمری همانند PCL، میانکنش ناکافی و غیراختصاصی بین پلیمرها و سلول‌ها است [۲۲]. بسیاری از پلیمرهای صناعی همانند PCL آب‌گریز بوده و فاقد گروه‌های فعالی همانند هیدروکسیل، کربوکسیل، آمین و سولفات است. راهبردهای تغییر سطح بسیاری برای ایجاد چنین گروه‌های فعالی در سطح PCL توسعه یافته است.

از آنجایی که سطح PCL فاقد گروه‌های فعالی مانند آمین یا کربوکسیل است، به راحتی نمی‌توان آن را تغییر داد. هیدرولیز بازی و آمینولیز روش‌های مناسبی برای ایجاد این گروه‌های فعال هستند. با این حال استفاده از این روش‌ها خصوصیات ساختاری و ریخت‌شناختی نانوفیبرهای PCL را تغییر داده و می‌تواند به تشکیل نانوفیبرهای ناپایدار از لحاظ مکانیکی و ریخت‌شناختی منجر شود [۲۳]. برای تولید گروه‌های فعال، معمولاً PCL با مولکول‌های زیستی (Biomolecules) دیگری همانند کلاژن، الاستین، فیروین و پپتیدهای فعال کننده سطح مخلوط شده یا سطح آن با این مولکول‌های زیستی تغییر داده می‌شود. ژلاتین که از کلاژن مشتق می‌شود، بسیار ارزان بوده و می‌تواند برای حل این کمبود استفاده شود. بنابراین در این مطالعه PCL به صورت فیزیکی با ژلاتین مخلوط شد. محققان حاضر به این نتیجه رسیدند که داربست PCL/Gel هیبرید دارای اتصال متقاطع خصوصیات چسبندگی سلولی بهبود یافته‌ای دارد. این بهبود چسبندگی حاصل حضور گروه‌های بسیار فعال و قطبی ژلاتین بر سطح نانوفیبرهای الکترورسی شده است. اثر PCL/Gel هیبرید بر رفتار سلولی در مطالعات قبلی بررسی شده است. نشان داده شده است که داربست نانوفیبری PCL/Gel می‌تواند تمایز سلول‌های بنیادی مخچه به سمت سلول‌های عصبی را افزایش دهد [۲۴]. داربست‌های هیبرید متشکل از PCL و کلاژن برای

بخشیده و مقاومت تخریبی آن را تعدیل نماید که باعث فراهم نمودن داربست‌هایی با یکپارچگی ساختاری بالا می‌شود [۲۹]. در این مطالعه پپتید مورد نظر بلافاصله پس از ایجاد اتصالات متقاطع تثبیت شد تا با استفاده از گروه‌های فعال شده کربوکسیل اضافی، پپتید از انتهای آمین بر روی داربست تثبیت شود. نشان داده شده است که ژلاتین نسبت به گروه آمین (لیزین) تقریباً ۱۲ درصد گروه کربوکسیل (گلوتامات و آسپاراتات) اضافی دارد [۳۰]. بنابراین زمانی که در ژلاتین به مقداری اتصال متقاطع ایجاد شود که آزمون نینهدرین منفی شود، تقریباً تمام گروه‌های آمین با گروه‌های کربوکسیل جفت شده‌است و گروه‌های کربوکسیل اضافی را می‌توان برای تثبیت پپتید و فعال‌سازی بیشتر استفاده کرد. برای تثبیت پپتید مورد نظر یا سایر بیومولکول‌ها راهبردهای متفاوتی استفاده می‌شود؛ به این منظور در پپتید ساخته شده دو گروه لیزین گنجانده شد تا پپتید از طریق گروه آمین زنجیره جانبی با گروه‌های کربوکسیلی که در مرحله ایجاد اتصال متقاطع فعال شده‌است، جفت شود. به دلیل این‌که پپتید ترکیب مشابهی با ژلاتین دارد، باید یک گروه فنیل آلانین تغییر یافته برای تأیید تثبیت پپتید روی داربست استفاده می‌شود. یافته‌های FTIR تثبیت پپتید روی داربست را تأیید می‌کنند.

نتایج تأیید کرد که تثبیت پپتید روی داربست، چسبندگی و تکثیر hBMSC را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. مشخص شده است که تثبیت موتیف‌های چسبندگی، شیمی سطح زیست مواد را بهبود می‌بخشد. طی سال‌های اخیر تعداد زیادی از پپتیدهای حاوی توالی RGD با توالی‌های متفاوت از منشاء پروتئین‌های ECM (Extracellular Matrix Proteins) ساخته شده است [۲۲]. این پپتیدهای روی چندین پلیمر و توسط روش‌های فیزیکی و شیمیایی مختلف تثبیت شده‌است. نشان داده شده است که تثبیت پپتیدهای حاوی توالی RGD روی زیست مواد نانوفیبری چسبندگی سلولی و میانکنش سلول-ماتریکس را بهبود می‌بخشد [۳۱-۳۲]. ژانگ (Zhang) و همکاران میانکنش hBMSC با داربست منفذدار

تغییر داده شده با RGD را مطالعه کرده‌اند. آن‌ها نشان داده‌اند که تثبیت RGD روی داربست PCL اتصال hBMSC و توزیع آن روی داربست را بهبود می‌بخشد. آن‌ها همچنین دریافته‌اند که مسیرهای انتقال پیام با واسطه اینتگرین‌ها توسط تغییر داربست با RGD فعال شده و افزایش می‌یابد. نشان داده شده است که فعال شدن این مسیرها منجر به بقا و رشد سلول می‌شود [۳۳].

نتایج بررسی‌های چسبندگی سلولی نشان داد که داربست PCL/Gel تغییر داده شده با پپتید طراحی شده قدرت چسبندگی بهتری نسبت به داربست PCL/Gel طبیعی دارد و می‌توان آن را برای تغییر سطح زیست موادی که قدرت چسبندگی پایینی دارد به کار برد. تثبیت پپتید همچنین اثر قابل توجهی بر تکثیر سلول‌های کشت داده شده داشت که این توانایی در تولید زیست موادی که برای پزشکی بازتوانی استفاده می‌شود، بسیار اهمیت دارد.

در این مطالعه یک پپتید جدید حاوی توالی RGD از منشأ کلاژن نوع IV سنتز شده و روی داربست فعال شده PCL/Gel تثبیت شد. یک نشانگر ید برای ردیابی تثبیت پپتید در توالی استفاده شد. برای تأیید خصوصیات چسبندگی سلولی، از آزمون MTT استفاده شد. نتایج نشان داد که تثبیت پپتید بر داربست با موفقیت انجام شده است و پپتید تثبیت شده می‌تواند چسبندگی و تکثیر سلولی را افزایش دهد. با در نظر گرفتن نتایج این مطالعه، تغییر داربست PCL/Gel توسط این پپتید جدید سازگاری زیستی و قابلیت استفاده از این داربست را در کشت سلول‌های بنیادی و مهندسی بافت را افزایش می‌دهد.

## تشکر و قدردانی

این مقاله مستخرج از رساله دکتری رشته بیوشیمی بالینی که با حمایت‌های مالی دانشکده علوم پزشکی دانشگاه تربیت مدرس انجام شده است.

- [1] Hench LL, Polak JM. Third-generation biomedical materials. *Science* 2002; 295(5557): 1014-7.
- [2] Stevens MM, George JH. Exploring and engineering the cell surface interface. *Science* 2005; 310(5751): 1135-8.
- [3] Hunt JA. Regenerative medicine: Materials in a cellular world. *Nat Mater* 2008; 7(8): 617-8.
- [4] Geiger B, Spatz JP, Bershadsky AD. Environmental sensing through focal adhesions. *Nat Rev Mol Cell Biol* 2009; 10(1): 21-33.
- [5] Peña J, Corrales T, Izquierdo-Barba I, Doadrio AL, Vallet-Regí M. Long term degradation of poly(3-caprolactone) films in biologically related fluids. *Polym Degrad Stab* 2006; 91: 1424-32.
- [6] Elbert DL and Hubbell JA. Surface Treatments of Polymers for Biocompatibility. *Annu Rev Mater Sci* 1996; 26: 294-365.
- [7] Hubbell JA. Bioactive biomaterials. *Curr Opin Biotechnol* 1999; 10(2): 123-9.
- [8] Jahani H, Kaviani S, Hassanpour-Ezatti M, Soleimani M, Kaviani Z, Zonoubi Z. The effect of aligned and random electrospun fibrous scaffolds on rat mesenchymal stem cell proliferation. *Cell J* 2012; 14(1): 31-8.
- [9] Eslaminejad MB, Bagheri F, Zandi M, Nejati E, Zomorodian E. Study of Mesenchymal Stem Cell Proliferation and Bone Differentiation on Composite Scaffolds of PLLA and Nano Hydroxyapatite with Different Morphologies. *Cell Journal (Yakhteh)* 2011; 12(4):469-76.
- [10] Zhang Y, Ouyang H, Lim CT, Ramakrishna S, Huang ZM. Electrospinning of gelatin fibers and gelatin/PCL composite fibrous scaffolds. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater* 2005; 72(1): 156-65.
- [11] Chong EJ, Phan TT, Lim IJ, Zhang YZ, Bay BH, Ramakrishna S, Lim CT. Evaluation of electrospun PCL/gelatin nanofibrous scaffold for wound healing and layered dermal reconstitution. *Acta Biomater* 2007; 3(3): 321-30.
- [12] Choi JS, Lee SJ, Christ GJ, Atala A, Yoo JJ. The influence of electrospun aligned poly(epsilon-caprolactone)/collagen nanofiber meshes on the formation of self-aligned skeletal muscle myotubes. *Biomaterials* 2008; 29(19): 2899-906.
- [13] Zhang YZ, Venugopal J, Huang ZM, Lim CT, Ramakrishna S. Characterization of the surface biocompatibility of the electrospun PCL-collagen nanofibers using fibroblasts. *Biomacromolecules* 2005; 6(5): 2583-9.
- [14] Wang S, Zhang Y, Yin G, Wang H, Dong Z. Electrospun Polylactide/Silk Fibroin-Gelatin Composite Tubular Scaffolds for Small-Diameter Tissue Engineering Blood Vessels. *J Appl Polym Sci* 2009; 113: 2675-82.
- [15] Jo S, Engel PS and Mikos AG. Synthesis of poly(ethylene glycol)-tethered poly(propylene fumarate) and its modification with GRGD peptide. *Polymer*. 2000; 41(21): 7595-604.
- [16] Quirk RA, Chan WC, Davies MC, Tandler SJ, Shakesheff KM. Poly(L-lysine)-GRGDS as a biomimetic surface modifier for poly(lactic acid). *Biomaterials* 2001; 22(8): 865-72.

- [17] Andukuri A, Kushwaha M, Tambralli A, Anderson JM, Dean DR, Berry JL, Sohn YD, Yoon YS, Brott BC, Jun HW. A hybrid biomimetic nanomatrix composed of electrospun polycaprolactone and bioactive peptide amphiphiles for cardiovascular implants. *Acta Biomater* 2011; 7(1): 225-33.
- [18] Tambralli A, Blakeney B, Anderson J, Kushwaha M, Andukuri A, Dean D, Jun HW. A hybrid biomimetic scaffold composed of electrospun polycaprolactone nanofibers and self-assembled peptide amphiphile nanofibers. *Biofabrication* 2009; 1(2): 025001.
- [19] van der Flier A, Sonnenberg A. Function and interactions of integrins. *Cell Tissue Res* 2001; 305(3): 285-98.
- [20] Ruoslahti E. RGD and other recognition sequences for integrins. *Annu Rev Cell Dev Biol* 1996; 12: 697-715.
- [21] Massumi M, Abasi M, Babaloo H, Terraf P, Safi M, Saeed M, Barzin J, Zandi M, Soleimani M. The effect of topography on differentiation fates of matrigel-coated mouse embryonic stem cells cultured on PLGA nanofibrous scaffolds. *Tissue Eng Part A* 2012; 18(5-6): 609-20.
- [22] Hersel U, Dahmen C, Kessler H. RGD modified polymers: biomaterials for stimulated cell adhesion and beyond. *Biomaterials* 2003; 24(24): 4385-415.
- [23] Zhang YZ, Venugopal J, Huang ZM, Lim CT, Ramakrishna S. Crosslinking of the electrospun gelatin nanofibers. *Polymer* 2006; 47(8): 2911-7.
- [24] Ghasemi-Mobarakeh L, Prabhakaran MP, Morshed M, Nasr-Esfahani MH, Ramakrishna S. Electrospun poly (epsilon-caprolactone)/gelatin nanofibrous scaffolds for nerve tissue engineering. *Biomaterials* 2008; 29(34): 4532-9.
- [25] Tillman BW, Yazdani SK, Lee SJ, Geary RL, Atala A, Yoo JJ. The in vivo stability of electrospun polycaprolactone-collagen scaffolds in vascular reconstruction. *Biomaterials* 2009; 30(4): 583-8.
- [26] McClure MJ, Sell SA, Simpson DG, Walpoth BH, Bowlin GL. A three-layered electrospun matrix to mimic native arterial architecture using polycaprolactone, elastin, and collagen: a preliminary study. *Acta Biomater* 2010; 6(7): 2422-33.
- [27] Sisson K, Zhang C, Farach-Carson MC, Chase DB, Rabolt JF. Evaluation of cross-linking methods for electrospun gelatin on cell growth and viability. *Biomacromolecules* 2009; 10(7): 1675-80.
- [28] Tomihata K, Ikada Y. Cross-linking of gelatin with carbodiimides. *Tissue Eng* 1996; 2(4): 307-13.
- [29] Grover CN, Cameron RE, Best SM. Investigating the morphological, mechanical and degradation properties of scaffolds comprising collagen, gelatin and elastin for use in soft tissue engineering. *J Mech Behav Biomed Mater* 2012; 10: 62-74.
- [30] Songchotikunpan P, Tattiyakul J, Supaphol P. Extraction and electrospinning of gelatin from fish skin. *Int J Biol Macromol* 2008; 42(3): 247-55.
- [31] Irvine DJ, Ruzette AV, Mayes AM, Griffith LG. Nanoscale clustering of RGD peptides at surfaces using comb polymers. 2. Surface

داربست نانوفیبری تغییر داده شده توسط پپتید RGD

- segregation of comb polymers in polylactide. *Biomacromolecules* 2001; 2(2): 545-56.
- [32] Park KH. Arg-Gly-Asp (RGD) sequence conjugated in a synthetic copolymer bearing a sugar moiety for improved culture of parenchymal cells (hepatocytes). *Biotechnol Lett* 2002; 24: 1401-6.
- [33] Zhang H, Lin CY, Hollister SJ. The interaction between bone marrow stromal cells and RGD-modified three-dimensional porous polycaprolactone scaffolds. *Biomaterials* 2009; 30(25): 4063-9.