

Implementation of a Haptic System for Simulation of In Vitro Fertilization (IVF)

Y. Rezaei moghaddam¹, S. M. Rezaei², M. Shamshirsaz³, M. Zareinejad^{4*}, M. R. Dehghan⁵

¹M.Sc student of Mechanical Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran. yrmoghadam@aut.ac.ir

²Professor of Mechanical Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, smrezaei@aut.ac.ir

³Associate Professor of New Technologies Research Center, Amirkabir University of Technology, Tehran, shamshir@aut.ac.ir

⁴Assistant Professor of New Technologies Research Center, Amirkabir University of Technology, Tehran.

⁵Ph.D student of Mechanical Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, mr_dehghan@aut.ac.ir

Abstract

In vitro fertilization (IVF) is a solution to overcome the problem of infertility of couples. Lately with the development of technology and using robotic systems, telesurgery systems are used in order to increase the accuracy, better control of needle movement and preventing injury to the ovum cell while injection in IVF. To provide better control of injection, haptic systems are used. In this study, a haptic system is designed with virtual reality environment in order to perform In vitro fertilization. For modeling of injection force, point-load model is utilized. A mass-spring model is used to simulate cell deformation during insertion. Simulation results have a good conformity with related researches.

Key words: mass-spring model, haptic systems, virtual reality, in vitro fertilization (IVF).

*Corresponding author

Address: New Technologies Research Center, 2nd Floor, No.467, ValiasrAve, postal code: 1591633311, Tehran, Iran.

Tel: +982166402044

Fax: +982166402044

E-mail: mzare@aut.ac.ir

پیاده‌سازی سیستم هپتیکی به منظور آموزش عملیات لقاح مصنوعی

یاسر رضایی مقدم^۱، سید مهدی رضاعی^۲، مهناز شمشیرساز^۳، محمد زارعی نژاد^{۴*}، محمدرضا دهقان^۵

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران yrmoghadam@aut.ac.ir

^۲استاد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران smrezaei@aut.ac.ir

^۳دانشیار پژوهشکده فناوری‌های نو، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران shamshir@aut.ac.ir

^۴استادیار پژوهشکده فناوری‌های نو، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران

^۵دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران mr_dehghan@aut.ac.ir

چکیده

یکی از شیوه‌های غلبه بر مشکل ناباروری زوجین، لقاح مصنوعی (IVF) است. در این فرایند مهمترین بخش برخورد سوزن با سلول است، به طوری که اگر نیروی برخورد بیش از چند میلی نیوتن باشد دیواره تخمک صدمه می‌بیند و فرایند تزریق ناموفق خواهد بود. از آنجایی که فرایند آماده‌سازی تخمک و اسپرم هزینه‌بر است، فراهم کردن بستری برای انجام تزریق بدون اشتباه امری اجتناب‌ناپذیر است. هدف این مقاله طراحی یک سیستم هپتیکی با محیط واقعیت مجازی به منظور آموزش کاربران برای انجام عملیات لقاح مصنوعی است. در این تحقیق، برای شبیه‌سازی نیروی تزریق از مدل نیرویی نقطه بار و برای شبیه‌سازی تغییر شکل سلول انعطاف‌پذیر، از مدل جرم و فنر استفاده شد. در نهایت با استفاده از یک واسط هپتیکی و محیط گرافیکی ایجاد شده عملیات تزریق شبیه‌سازی شده است. همچنین با استفاده از آزمایش تجربی و ثبت نیرو، صحت عملکرد این شبیه‌سازی تأیید شد.

کلیدواژگان: لقاح مصنوعی، واقعیت مجازی، هپتیک، جرم و فنر، آموزش کاربر.

*عهددار مکاتبات

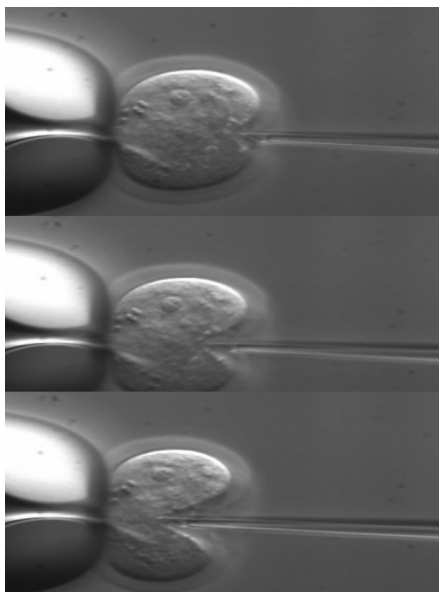
نشانی: تهران، خیابان ولیعصر، نش کوچه بالاور، شماره ۴۶۷، ساختمان معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه صنعتی امیرکبیر، طبقه دوم، پژوهشکده فناوری‌های نو،

صندوق پستی: ۱۵۹۱۶۳۳۳۱۱

تلفن: ۰۲۱-۶۶۴۰۲۰۴۴، دورنگار: ۰۲۱-۶۶۴۰۲۰۴۴، پیام‌نگار: mzare@aut.ac.ir

۱- مقدمه

فرایند تزریق داشته؛ اما دارای معایبی نظیر دشواری استفاده، قابلیت کنترل کم و هزینه زیاد است [۷].



شکل (۱) - نمایی از فرایند تزریق در سلول [۱]

علاوه بر یافتن مدل‌های مکانیکی نیرویی در فرایند تزریق، در زمینه شبیه‌سازی این فرایند درون سلول بر مبنای واقعیت مجازی و شبیه‌سازی هپتیک فرایند با بازخورد نیرو تحقیقات زیادی انجام شده است. در سیستم‌های واقعیت مجازی، ابزاری ورودی حرکات جراح را گرفته؛ به نرم‌افزار منتقل می‌کند. همچنین نیروهای ایجاد شده در اثر تقابل اشیا در محیط مجازی محاسبه شده؛ به دست جراح وارد می‌شود. این بخش با نام واسط هپتیک یا شبیه ساز هپتیک شناخته می‌شود.

میزوکامی^۳ و همکارانش سیستمی هپتیک به منظور شبیه‌سازی فرایند تزریق در سلول ایجاد کردند. ایشان با استفاده از منحنی‌های نرَبز^۴ تغییر شکل سلول را در عملیات تزریق شبیه‌سازی و از مدل نیرویی فنر-دمپر برای بازخورد نیرو استفاده کردند [۲]. مشکل این مدل واقعیت مجازی وجود تأخیر در ارائه مدل نمایشی بود.

لادجال^۵ و همکارانش با استفاده از روش اجزای محدود و کاربرد دانه‌بندی‌های چهاروجهی نیروهای فرایند تزریق را شبیه‌سازی کردند که نتیجه آن تطابق خوبی با واقعیت داشت [۳]؛ اما در شبیه‌سازی واقعیت مجازی تغییر شکل سلول حین تزریق تطابق خوبی با واقعیت نداشت.

یکی از شیوه‌های غلبه بر مشکل ناباروری زوجین، لقاح مصنوعی^۱ (IVF) است. در این روش تخمک آماده باروری را با جراحی از بدن زن و اسپرم‌های دارای قدرت باروری را از بدن مرد گرفته و در شرایط کنترل شده اسپرم‌ها را به درون تخمک تزریق می‌کنند. سپس تخمک بارور شده را به منظور انجام تقسیمات سلولی در محیط کشت مناسب قرار می‌دهند. در این روش مهمترین بخش برخورد سوزن با سلول است که اگر نیرو بیش از چند میلی نیوتن باشد، دیواره تخمک صدمه می‌بیند و فرایند تزریق ناموفق خواهد بود. از آنجایی که فرایند آماده‌سازی تخمک و اسپرم هزینه‌بر است، فراهم کردن بستری برای انجام تزریقی بدون اشتباه، اجتناب‌ناپذیر است. در سال‌های اخیر، با پیشرفت تکنولوژی و روند رو به رشد استفاده از سیستم‌های رباتیک، به منظور افزایش دقت، کنترل بهتر حرکت سوزن و جلوگیری از آسیب‌رسانی به سلول تخمک حین تزریق در عملیات لقاح مصنوعی از سیستم‌های جراحی از راه دور استفاده می‌شود. این سیستم‌ها با استفاده از سیستم‌های تصویربرداری میکروسکوپی و نیز به کمک حس لامسه مصنوعی، کنترل بهتر تزریق را برای کاربر فراهم می‌کند. در شکل (۱) فرایند تزریق در سلول نشان داده شده است [۶-۱]. از آنجایی که این فرایند داری حساسیت زیادی در تزریق است و اشتباه جراح در اعمال نیرو منجر به تخریب دیواره تخمک می‌شود، باید امکان آموزش فرد تزریق کننده فراهم شود. بدین منظور باید شناختی کامل از فرایند تزریق فراهم شود؛ از این رو فهم ارتباط بین تغییر شکل سلول و نیروهای مکانیکی بسیار حائز اهمیت است. به علت غیر یکنواخت بودن طبیعت سلول‌ها، تکنیک‌های متفاوتی به صورت تجربی برای بررسی پاسخ و یافتن خواص مکانیکی سلول‌ها استفاده شده است. از آن جمله می‌توان به بررسی ذره‌بینی نیروهای اتمی^۲ (AFM)، فیچی نوری-لیزری و بسط یابنده‌های میکرو صفحه‌ای اشاره کرد.

محققان با استفاده از روش‌های متفاوت، مدل‌های مکانیکی مختلفی را برای مدلسازی فرایند تزریق ارائه کرده‌اند که از این جمله می‌توان به مدل‌های پوسته‌ای هسته مایع و مدل‌های جامد اشاره کرد. روش‌های تجربی تأثیر فراوانی بر مطالعات سلول‌ها و

^۱In Vitro Fertilisation
^۳Ladjal

^۲Atomic Force Microscopy

^۳Mizokami

^۴Nurbs

تخمک موش بود. در این مدل نیرویی با استفاده از چند پارامتر، ویژگی‌های سلول و سوزن تزریق مشخص شدند که عبارت بودند از: c ، a و w_d . این پارامترها در شکل (۲) مشخص شده‌اند؛ همچنین مقادیر این پارامترها در جدول (۱) قابل مشاهده است.

جدول (۱)- پارامترهای مورد استفاده در مدل نیرویی [۱]

پارامتر	مقدار عددی
c	۳ μm
a	۱۴ μm
R	۲۵ μm
h	۴/۵ μm
ν	۰/۵
E	۴۲/۲ kpa

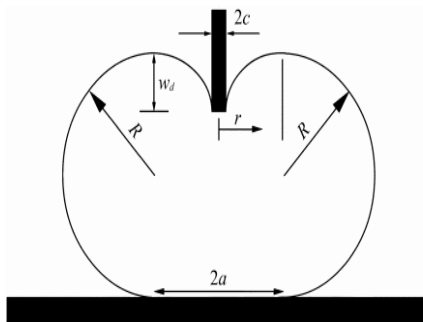
با استفاده از معادله یانگ-لاپلاس^۷ - که فشار اضافی را با تنش پوسته‌ای و هندسه مرتبط می‌کند- و همچنین روابط الاستیک خطی از جمله قانون هوک، رابطه (۱) برای محاسبه نیروی تزریق به سلول به دست می‌آید [۱]:

$$F = \frac{2\pi E h w_d^3}{a^2 (1-\nu)} \left[\frac{3-4\zeta^2 + \zeta^4 + 2\ln \zeta^2}{(1-\zeta^2)(1-\zeta^2 + \ln \zeta^2)^3} \right] \quad (1)$$

که در آن:

$$\zeta = \frac{c}{a} \quad (2)$$

در این رابطه E مدول الاستیسیته، h ضخامت دیواره غشا، ν ضریب پواسون و c نصف عرض سوزن تزریق است. سوزن در هنگام نفوذ در سلول سوراخی به عمق w_d ایجاد و سلول را به دو نیم‌دایره با شعاع R تقسیم می‌کند [۱].



شکل (۲)- شکل نمادین مدل نیرویی و پارامترهای هندسی [۱].

نصیری سروی و همکارانش نیز با استفاده از روش سوپر المان‌های کروی تغییر شکل سلول را در فرایند تزریق بررسی کردند که نتایج آن‌ها همخوانی زیادی با رفتار سلول دارد [۱۲]؛ اما به علت حجم زیاد محاسبات امکان استفاده از این روش در شرایط بی‌درنگ وجود ندارد.

لادجال و همکارانش با استفاده از روش‌های اجزای محدود به شبیه‌سازی فرایند تزریق پرداخته‌اند [۱۳]. ایراد این روش آن است که سلول به طور نیمه ایجاد شده است و در شبیه‌سازی فرایند تزریق به جای سوزن از AFM استفاده شده است. ویژگی این تحقیق به کار بردن روش اجزای محدود به صورت بی‌درنگ است.

در این مقاله با استفاده از مدل نیرویی ارائه شده در بخش بعد، فرایند تزریق در سلول را به صورت گرافیکی شبیه‌سازی کرده؛ و نیروی حاصل از این فرایند با سیستمی هپتیک طراحی شده به دست کاربر بازخورد می‌شود. این سیستم می‌تواند به منظور آموزش جراحان قبل از انجام عمل به صورت آزمایشگاهی استفاده می‌شود.

۲- روش

۲-۱- مدل نیرویی استفاده شده در شبیه‌سازی

یکی از روش‌هایی که به طور ثنوری برای مدلسازی مکانیکی فرایند تزریق در سلول به منظور محاسبه نیروی تزریق ارائه شده، مدل نقطه بار^۶ است. در این مدل سلول مانند غشایی نازک فرض شده به طوری که درون این غشا فشار هیدرواستاتیک وجود دارد [۱]. در این مدل‌سازی فرضیات زیر در نظر گرفته شد:

- ۱- فشار یکنواخت هیدرواستاتیک درون سلول وجود دارد.
 - ۲- تغییر شکل سلول به صورت کاملاً کششی است و سلول مقاومت خمشی ناچیزی دارد.
 - ۳- حجم سلول همواره ثابت است.
 - ۴- سلول دارای ویژگی الاستیک خطی است.
 - ۵- غشای سلول عاری از هرگونه تنش اولیه است.
 - ۶- مدل با منطقه‌ای مدور مسطح عاری از تنش آغاز می‌شود.
- نوع سلول مورد استفاده برای شبیه‌سازی فرایند تزریق

^۶point-load model

^۷Young-Laplace

۲-۲- نحوه شبیه‌سازی محیط گرافیکی و هپتیک

برای شبیه‌سازی سیستم از برنامه‌نویسی به زبان ++C و نرم‌افزار Microsoft Visual Studio همراه کتابخانه‌های OpenGL به منظور شبیه‌سازی گرافیکی و کتابخانه Chai3d برای شبیه‌سازی نیرویی و هپتیک استفاده شد. محیط شبیه‌سازی شده دارای سه جزء مجزا، شامل سوزن تزریق، سلول و نگهدارنده^۸ بود. کتابخانه Chai3d یک پایگاه نرم‌افزاری به منظور شبیه‌سازی هپتیک است که محققان دانشگاه استنفورد آنرا ایجاد کرده‌اند و در اختیار سایر محققان قرار داده‌اند. از Chai3d در بازی‌ها، شبیه‌سازها و نرم‌افزارهای آموزشی استفاده می‌شود.

این پایگاه به زبان برنامه‌نویسی ++C نوشته شده؛ لذا علاوه بر ایجاد راحتی کار برای برنامه‌نویس‌ها در ارائه مدل‌سازی‌های سه‌بعدی با بازخورد نیرو، باعث برقراری ارتباط بهتر این افراد را با پایگاه می‌شود. کتابخانه Chai3d به راحتی با وسایل هپتیک - که این پایگاه پشتیبانی می‌کند- ارتباط برقرار کرده؛ آن‌ها را به رایانه مورد نظر متصل می‌کند. ویژگی برجسته این پایگاه پاسخگویی بی‌درنگ آن است [۴].

برای شبیه‌سازی اجسام انعطاف‌پذیر در سیستم‌های هپتیک روش‌های متفاوتی از قبیل منحنی‌های اسپلاین^۹ انعطاف‌پذیر، روش جرم و فنر، حجم‌های به هم متصل شده و مدل‌سازی اجزای محدود وجود دارد. در این تحقیق شبیه‌سازی با استفاده از مدل جرم و فنر انجام گرفته شد. در این روش جسم را دانه‌بندی کرده به طوری که در دانه‌بندی‌های تولیدی لبه‌های سطح دانه‌بندی نشان‌دهنده فنرها و رئوس آنها نشان‌دهنده جرم‌ها بودند.

پس از دانه‌بندی با استفاده از قانون نیوتن و رابطه (۳) برای هر نقطه، ابتدا نیروهای خارجی محاسبه شد. نیروهای خارجی شامل سه نیروی فنر متصل‌کننده بین نقاط، نیروی حاصل از برخورد جرم‌های تخصیص‌یافته به هر نقطه به سایر نقاط و نیروی گرانش وارد بر هر نقطه بود. پس از محاسبه نیروهای خارجی با استفاده از قانون دوم نیوتن شتاب هر نقطه محاسبه شد [۵]:

$$m^i \frac{d^2 r^i}{dt^2} + \gamma \frac{dr^i}{dt} + f_{int}^i = f_{ext}^i \quad (3)$$

که m^i جرم هر نقطه، γ ضریب اصطکاک، f_{ext}^i نیروی

خارجی و f_{int}^i نیروی است، به طوری که نیروی داخلی از رابطه (۴) به دست می‌آید [۵]:

$$f_{int}^i = \sum_{j \in N_i} K_j^i \frac{|r^j - r^i| - |r^j - r^i|^0}{|r^j - r^i|} (r^j - r^i) \quad (4)$$

N_i مجموعه نقاطی هستند که با فنر به نقطه i متصل‌اند و K_j^i سختی فنری است که نقطه i را به نقطه j وصل می‌کند و $|r^j - r^i|^0$ و $|r^j - r^i|$ به ترتیب طول کنونی و طول ابتدایی فنرها است. نهایتاً محل نقاط و سرعت آنها در هر لحظه محاسبه شد. یکی از مزایای عمده مدل جرم و فنر سادگی دانه‌بندی آن است که برای نمایش مستقیم مدل ایده‌آل است. همچنین مجموعه معادلات نیز برای محاسبه و برنامه‌نویسی، آسان است.

در مدل جرم و فنر دانه‌بندی‌ها به طور قابل توجهی دارای ساختار محلی و متأثر از گره‌های مجاور خود هستند. این مسئله امکان نمایش تغییر شکل‌های بزرگ را با واقعگرایی نسبتاً زیاد در اختیار کاربر قرار می‌دهد. مدل‌های نوع جرم و فنر در حال حاضر، بیشترین کاربرد را در شبیه‌سازی اجسام انعطاف‌پذیر دارند و کاربرد آنها به شبیه‌سازی‌های جراحی محدود نمی‌شود. گنتی است که سایر روش‌های شبیه‌سازی نتوانسته‌اند مانند این روش پیشرفت کنند و در پاره‌ای از موارد تنها روش مورد استفاده برای شبیه‌سازی، محدود به این روش است. این تمایز به علت ساختار دانه‌بندی ساده و برنامه‌نویسی آسان مدل‌های جرم و فنر است [۶،۵].

در سیستم هپتیک طراحی شده برای شبیه‌سازی سلول مدل مورد نظر را بر طبق روش جرم و فنر به تعدادی نقاط تقسیم کرده؛ این نقاط با فنرهای به یکدیگر متصل می‌شوند. برای هر نقطه از قانون دوم نیوتن و خاصیت استهلاک وابسته به سرعت استفاده می‌شود.

در شبیه‌سازی اجسام انعطاف‌پذیر روش‌های متفاوتی برای شناسایی برخورد بین نقاط وجود دارد. برخورد را می‌توان بسیار سریع با استفاده از آزمون بررسی محدوده حجم تشخیص داد. رایج‌ترین روش‌های شناسایی برخورد در محدوده حجم عبارتند از تقاطع کره با کره و تقاطع جعبه با جعبه. در این تحقیق از روش تقاطع کره با کره برای شناسایی برخورد و اندازه گرفتن مقدار نفوذ استفاده شد [۸، ۱۰]. دو کره هنگامی برخورد کرده و متقاطع‌اند که فاصله بین مراکز آنها کمتر از مجموع شعاعشان باشد.

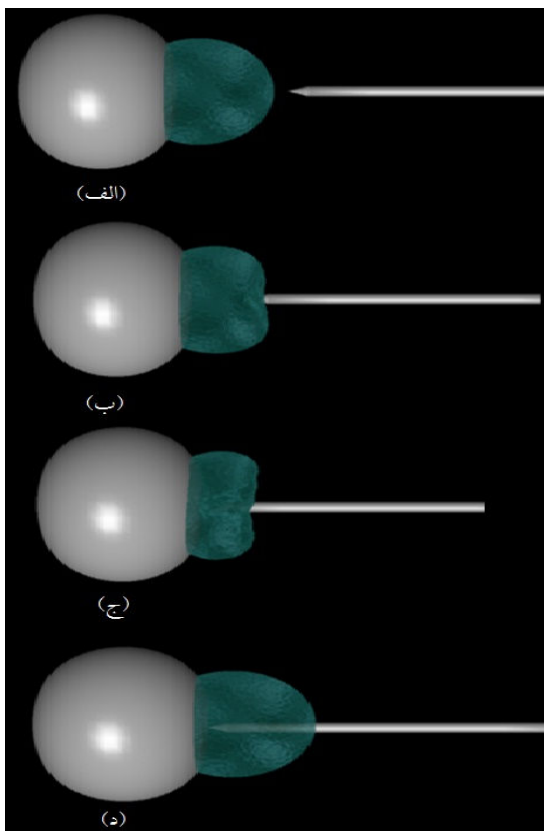
برای شبیه‌سازی سلول به شکل انعطاف‌پذیر ۱۸۰ نقطه- که

^۸Gripper

^۹Spline

سوزن به شکل کره‌ای توپر در نظر گرفته شد به طوری که هنگام انجام تزریق با کره‌های تشکیل دهنده سلول برخورد می‌کرد. با حرکت سوزن به سمت سلول، سوزن باعث تغییر شکل سلول می‌شد. برای نمایش سوراخ شدن از نظر گرافیکی این تغییر شکل تا جایی ادامه می‌یافت که میزان جابجایی سوزن پس از شروع تغییر شکل برابر با مجموع بیشترین تغییر طول فنرهای بین کره‌های تشکیل دهنده سلول می‌شد. پس از آن سوزن از دیواره سلول عبور کرده؛ سلول سوراخ می‌شد. از نظر نیرویی، اعمال نیروی بازخورد تا لحظه سوراخ شدن ادامه می‌یابد و پس از سوراخ شدن نیروی بازخورد حذف می‌شود؛ بنابراین این از میزان نیروی بازخوردی می‌توان به سوراخ شدن غشای سلول پی برد.

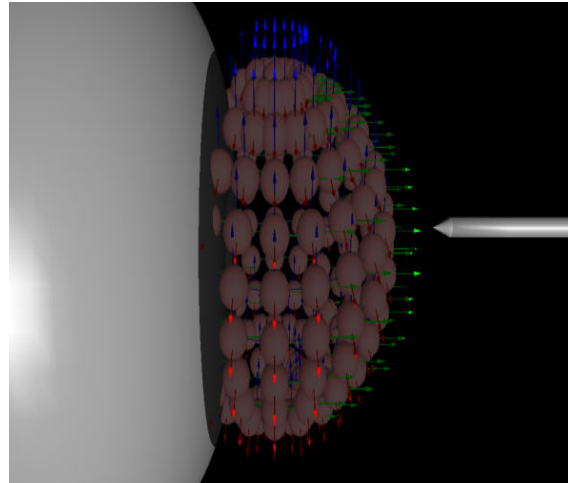
در قسمت (د) شکل (۴) دیواره سلول سوراخ شده؛ به حالت اولیه خود بازگشته‌است.



شکل (۴) - محیط گرافیکی شبیه‌سازی شده

(الف) قبل از نفوذ (ب) شروع نفوذ (ج) انتهای نفوذ (د) بعد از نفوذ

برای آنها ویژگی‌هایی از قبیل شعاع، استهلاک جابجایی، استهلاک زاویه‌ای و جرم تعریف شده بود- استفاده شد. این نقاط بر روی مدارهای سطح یک کره قرار داده شدند، به طوری که در هر مدار ۱۵ کره قرار داشت و هر نقطه به نقاط مجاورش متصل شد. در شکل (۳) می‌توان نحوه چیدمان نقاط را بر روی کره مشاهده کرد.



شکل (۳) - نحوه تشکیل جسم انعطاف‌پذیر با استفاده از مجموعه‌ای از نقاط

برای چیدن نقاط روی کره از مختصات کروی استفاده شد، به گونه‌ای که با حلقه‌ای در مختصات کروی، مختصات طول، عرض و ارتفاع نقاط بر طبق رابطه (۵) محاسبه شد:

$$\begin{aligned} x &= r \cos(\theta) \sin(\varphi) \\ y &= r \sin(\theta) \sin(\varphi), 0 \leq \theta \leq 2\pi, 0 \leq \varphi \leq \pi \\ z &= r \cos(\varphi) \end{aligned} \quad (5)$$

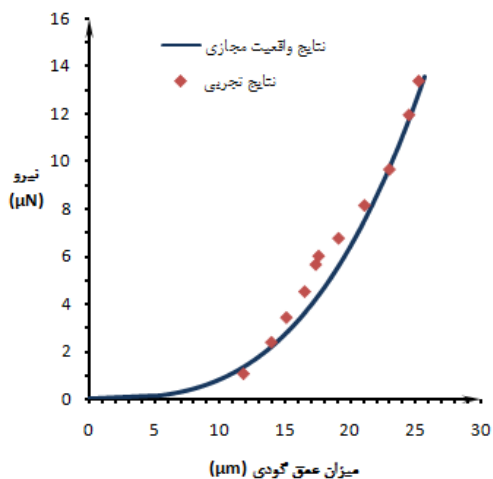
لازم است ذکر شود که در این تحقیق اجزای فرایند تزریق در محیط مجازی به شکل سه‌بعدی شبیه‌سازی شدند و این شبیه‌سازی دارای قابلیت اجرای بی‌درنگ بود. محیط مجازی شبیه‌سازی شده در شکل (۴) قابل مشاهده است.

در بخش (الف) شکل (۴) سوزن تزریق هنوز وارد سلول نشده‌است. در قسمت (ب) سوزن آستانه نفوذ است و در دیواره سلول تغییر شکل ایجاد شده، ولی هنوز دیواره سوراخ نشده‌است؛ در این لحظه نیروی بازخوردی به دست کاربر وارد می‌شود. در قسمت (ج) تغییر شکل سلول بیشترین مقدار را دارد و لحظه پایانی نفوذ است؛ همچنین نیروی بازخوردی بیشینه است.



شکل (۶) - مجموعه مورد استفاده در ثبت نیروی بازخوردی

شایان ذکر است هنگام محاسبه نیروهای بازخورد، به منظور قابل احساس بودن این نیروها برای کاربر، در مقیاس 5×10^0 ضرب شدند و هنگام مقایسه نتایج نیروهای بازخوردی ثبت شده با سنسور نیرو بر این مقیاس تقسیم شدند. همچنین برای بررسی محیط مجازی و نحوه عملکرد آن برای عمق نفوذهای مشخص، تغییر شکل سلول در محیط واقعیت مجازی و تصاویر تزریق واقعی مقایسه شدند و نتایج این مقایسه در شکل (۸) قابل مشاهده است. لازم است ذکر شود که برای مقایسه بهتر، سلول به صورت دو بعدی و میان تهی در نظر گرفته شد و نگهدارنده نیز حذف شد.



شکل (۷) - مقایسه نمودار نیروی بازخورد شده توسط محیط واقعیت مجازی با نتایج تجربی بر حسب عمق گودی

۴- بحث و نتیجه‌گیری

هدف این تحقیق ایجاد یک محیط واقعیت مجازی مبتنی بر واقعیت فرایند تزریق در عملیات لقاح مصنوعی بود. بدین منظور

۳-۲- واسط هپتیکی (ربات فالکون)

ربات فالکون^{۱۱} یکی از ابزارهای هپتیکی و نمونه‌ای از ربات‌های موازی است که سه درجه آزادی انتقالی در راستای سه محور مختصات دارد. این ربات در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل (۵) - واسط هپتیکی (ربات Falcon)

فالکون نمونه‌ای از ربات دانشگاه میرلند^{۱۱} است که به منظور کاربردهای فضایی ساخته شده است. این ربات شباهت زیادی به ربات دلتا^{۱۲} دارد [۸]. تفاوت ربات فالکون و ربات دلتا در مفاصل میانی است؛ که در دلتا این مفاصل کروی هستند ولی در فالکون از دو مفصل چرخان با یک درجه آزادی استفاده شده است [۹].

با توجه به اینکه فرایند شبیه‌سازی تزریق در سلول دارای سه درجه آزادی است، باید از رباتی به عنوان واسط هپتیکی استفاده شود که قابلیت حرکت و اعمال نیرو را در سه درجه آزادی داشته باشد؛ لذا از ربات فالکون استفاده شد.

۳- نتایج

پس از انجام شبیه‌سازی و انتخاب مدل نیرویی و اتصال آن به برنامه، با استفاده از مجموعه شکل (۶)، آزمایش‌هایی برای ثبت نیروی بازخوردی از مدل شبیه‌سازی شده به واسط هپتیکی انجام شد. به منظور ثبت نیروی بازخورد شده از نرم‌افزار یک حسگر نیروی پنج کیلوگرمی به بر روی ربات فالکون نصب شد. همچنین از یک تقویت‌کننده ولتاژ برای تقویت خروجی نیروسنج استفاده شد. نیروی بازخوردی به دست آمده از نیروسنج بر حسب عمق گودی در شکل (۷) قابل مشاهده است.

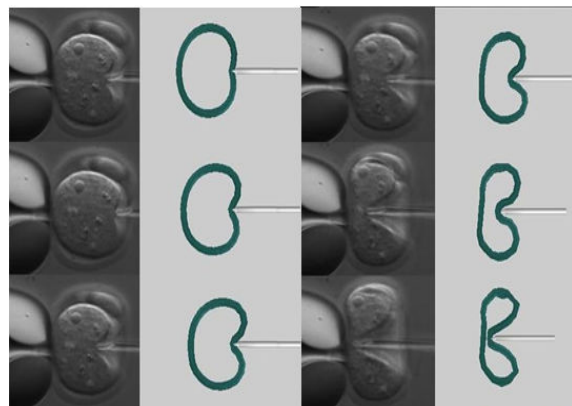
^{۱۰}Falcon

^{۱۱}The University of Maryland

^{۱۲}Delta Robot

- of Mouse Zona Pellucida; IEEE, Transactions On Nanobioscience, 2003; 2(4): 279-286.
- [3] Abbasi A.A., AHMADIAN M.T., Vossoughi G.R., Deformation Prediction Of Mouse Embryos In Cell Injection Experiment By A Feed Forward Artificial Neural Network; Proceedings of the ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE, 2011.
- [4] Mizokami A., Abe N., Kinoshita Y., Simulation of ICSI Procedure using Virtual Haptic Feedback Model; IEEE/ICME International Conference on Complex Medical Engineering, 2007
- [5] Ladjal H., Hanus J.L., Ferreira A., Methodologies of Dynamic Cell Injection Techniques Using FEM-Biomechanical Modeling; IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, 2008.
- [6] Nasiri Sarvi M., Ahmadian M.T., Application Of A New Spherical Super Element In Predicting The Deformation Of Biological Cells In Microinjection; Proceedings of the ASME International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, Washington, 2011.
- [7] Ladjal H., Hanus J.L., Reality-Based Real-Time Cell Indentation Simulator; IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS.
- [8] <http://www.chai3d.org/download.html>
- [9] Meier U., L'opez O., Monserrat C., M.C.Juan, M.Alcañiz, Real-time deformable models for surgery simulation: a survey; Computer Methods and Programs in Biomedicine, 2005; 77: 183-197.
- [10] Martin S., Hillier N., Characterisation of the Novint Falcon Haptic Device for Application as a Robot Manipulator; Australasian Conference on Robotics and Automation (ACRA), 2009; pp.2-4.
- [11] Hnez P.J., Thomas F., Torras C., 3D Collision Detection: a survey; Computers & Graphics, Technical Section, 2001; pp. 269-285.
- [12] <http://www.nonpolynomial.com/2008/03/25/everything-i-know-about-the-novint-falcon-as-of-march-2008/>

محیط گرافیکی با برنامه‌نویسی به زبان ++C شبیه‌سازی شد. در این محیط برای محاسبه نیروی ناشی از مقاومت سلول در برابر ورود سوزن تزریق و ارائه آن به صورت نیروی بازخورد بر دست جراح از مدل نیرویی نقطه بار- که صحت آن قبلاً بررسی شده بود- استفاده شد. نیروی بازخورد پس از برخورد سوزن به سلول در محیط شبیه‌سازی تزریق به واسطه هپتیکی وارد و با حسگر نیرو ثبت می‌شد. همانگونه که از بررسی نمودار شکل (۷) و مقایسه نیروی بازخورد و نیروی حاصل از آزمایش‌های تجربی دریافت می‌شود، انطباق خوبی بین نیروی بازخوردی و نتایج برقرار است و میزان بیشترین اختلاف در محاسبه نیرو و نتایج تجربی برابر با $1/4 \mu\text{N}$ است. همچنین با مشاهده شکل (۸) که نشان دهنده مقایسه بین نحوه تغییر شکل سلول در واقعیت و در محیط واقعیت مجازی است، این مساله دریافت می‌شود که سیستم شبیه‌سازی شده تطابق خوبی در بازخورد نیرو و نحوه تغییر شکل سلول با عملیات واقعی تزریق دارد. این تطابق بی‌درنگ بودن بازخورد نیرو در این شبیه‌سازی می‌تواند تاثیر زیادی در آموزش جراحان برای انجام صحیح عملیات تزریق داشته باشد. از نکات قابل توجه این آموزش انجام کم هزینه و مجازی آن است.



شکل (۸)- مقایسه تغییر شکل سلول حین تزریق در محیط واقعیت مجازی و تصاویر واقعی

۵- مراجع

- [1] Flückiger M., Cell Membrane Mechanical Modeling For Microrobotic Manipulation; Swiss Federal Institute Of Technology Zurich, 2009; pp. 15-49.
- [2] Sun Y., Wan K.T., Roberts K.P., Bischof J.C., Nelson B.J, Mechanical Property Characterization