

Comparison of Friction Force at Contact Surfaces between the Arch Wire and the Slot of Orthodontic Bracket: a Finite Element Method

M. Lashgari¹, F. Ghalichi^{2*}, B. Mirzakouchaki³

¹M.Sc., Biomedical Engineering Department, Faculty of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran, M_lashgari@sut.ac.ir

^{2*} Professor, Biomedical Engineering Department, Faculty of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.

³ Associate Professor, Division of Orthodontics, School of Dentistry, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran mirzakouchaki@gmail.com

Abstract

Orthodontic specialists interest in study of tooth movement mechanic, such as the relationship between applied force and the rate of tooth movement in orthodontic treatment. It is because of the complexity and variety of factors that can affect orthodontic treatment. The friction force at the contact surfaces with an undetermined magnitude, makes the orthodontic treatment unpredictable. In this study, friction coefficient and forces were investigated in new designed bracket that had beveled edge which has been modeled based on standard bracket. Torque, tip and angulations angles of the brackets slot are designed. Arch wires were modeled by two rectangular and circular cross-sections and the effect of geometry on the stress distribution and the friction force was investigated using Finite Element Method (FEM). The results have showed that the stress concentration generated in the bracket which has been the most curvature, decreased compared to the standard bracket at the contact wire and bracket braces. In addition, results have showed that friction in the beveled edge bracket was significantly decline compared to the standard bracket and also are less than the type with minor curvature. Results of investigation of friction between the two types of round and square wire, have revealed that the round wire has lower friction and confirmed previous studies. Finally, due to the reduced friction in the brackets which have been the most curvature, this type of design is appropriate to decrease friction force.

Key words: Orthodontics bracket, Finite element method, Critical contact angle, Friction force, Curvature in Outlet Edges (COE).

* Corresponding author

Address: Biomedical Engineering Department, Faculty of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran, P.O.Box: 51335-1996, Postal Code: 513358/1996.

Tel: +98 411 345 9419

Fax: +98 411 344 4309

E-mail: fghalichi@sut.ac.ir

بررسی مقایسه‌ای نیروی اصطکاک در محل تماس بین سیم و شیار براکت ارتودنسی به روش اجزای محدود

مصطفی لشگری^۱، فرزانه قالیچی^{۲*}، بهنام میرزا کوچکی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی پزشکی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

M_lashgari@sut.ac.ir

^۲ استاد، گروه مهندسی پزشکی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران.

^۳ دانشیار، گروه ارتودنسی، دانشکده دندانپزشکی، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، mirzakouchaki@gmail.com

چکیده

به دلیل پیچیدگی‌ها و عوامل مختلفی که بر ارتودنسی مؤثر هستند، متخصصان ارتودنسی در صدد مطالعه مکانیزم حرکت دندان از قبیل تعیین رابطه بین اندازه نیروی اعمالی و نرخ حرکت دندان در ارتودنسی هستند. در این میان وجود نیروی اصطکاک با مقدار نامعین در محل تماس درمان ارتودنسی را غیر قابل پیش‌بینی می‌کند. در این تحقیق براکت استاندارد با مدل‌های براکت طراحی شده بر اساس گرد کردن لبه‌های خروجی سیم از شیار براکت، با توجه به زوایای موجود در شیار براکت، با دو نوع سیم ارتودنسی با مقطع مستطیل شکل و دایره‌ای مدل‌سازی شدند و اثر هندسه‌های مختلف بر توزیع تنش و نیروی اصطکاک با استفاده از روش اجزای محدود بررسی شده است. نتایج نشان داد در براکت‌هایی که دارای انحنا بیشتر در باله هستند، شدت توزیع تنش در محل تماس سیم و براکت در مقایسه با براکت استاندارد کاهش یافته است. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش انحنا، مقدار اصطکاک در براکت با باله استوانه‌ای در مقایسه با براکت استاندارد کاهش قابل توجه دارد و در مقایسه با براکت‌های دارای انحنا، کمتر است. بررسی نتایج تفاوت اصطکاک در دو نوع سیم با مقطع گرد و مستطیلی، کاهش اصطکاک را در سیم مقطع دایره‌ای در مقایسه با سیم مقطع مستطیلی نشان داد و مطالعات قبلی را تأیید کرد. در نهایت با توجه به کاهش اصطکاک در براکت‌هایی با باله دارای انحنا بیشتر، طراحی این نوع براکت و استفاده از آن بمنظور کاهش اصطکاک مناسب به نظر می‌رسد.

کلیدواژگان: براکت ارتودنسی، روش اجزای محدود، زاویه تماس بحرانی، نیروی اصطکاک، انحنا لبه خروجی.

*عهده‌دار مکاتبات

نشانی: تبریز، دانشگاه صنعتی سهند، دانشکده مهندسی مکانیک، گروه مهندسی پزشکی، کدپستی: ۱۹۹۶-۵۱۳۳۵

تلفن: ۰۴۱۱-۳۴۵۹۴۱۹، دورنگار: ۰۴۱۱-۳۴۴۴۳۰۹، پیام‌نگار: fgihalichi@sut.ac.ir

۱- مقدمه

ارتودنسی، روشی برای جابه‌جا کردن و حرکت دادن دندان‌ها بمنظور قرارگیری در موقعیت مناسب آنها در منحنی فک است. سیم‌ها و براکت‌های ارتودنسی اجزای مهمی از وسایل ارتودنسی هستند. به کاهش اصطکاک بین سطح تماس سیم و شیار براکت در مسائل جدید بالینی ارتودنسی از طرف سازندگان براکت‌های ارتودنسی توجه بسیار شده است [۱].

مقدار ضریب اصطکاک وابسته به جنس دو سطح است؛ البته عوامل دیگری مانند سرعت و مساحت سطح تماس نیز در آن دخیل است. وقتی براکت یا سیمی که درون شیار آن قرار دارد، بر روی هم می‌لغزند؛ مقاومتی ایجاد می‌شود. این مقاومت که از تداخل سیم-براکت بوجود می‌آید از دستیابی به نیرویی بهینه که از بافت‌های حمایت‌کننده به دست می‌آید؛ می‌کاهد [۲]. وجود نیروی اصطکاک با مقدار نامعین در محل تماس، درمان ارتودنسی را غیر قابل پیش‌بینی می‌کند. اگر مقدار نیروی اصطکاک کم باشد، تمام نیروهای ارتودنسی به کار رفته به حرکت دندان کمک می‌کنند و مقدار آن را می‌توان تخمین زد؛ زمانی که نیروی اصطکاک زیاد و یا ارزیابی آن دشوار باشد، فشار وارد بر روی دندان از طرف سیم مبهم خواهد بود [۳]. بر طبق مطالعات درشر^۱ و همکارانش، بالغ بر ۶۰٪ نیروی ارتودنسی به کار رفته صرف نیروی مقاومت اصطکاک می‌شود [۴]؛ بنابراین کاهش اصطکاک باعث پاسخ بهتر بافت سخت و نرم می‌شود.

مهمترین عامل در ایجاد اصطکاک، نیروی وارد بر سطح یا نیرویی است که دو جسم را به هم می‌فشارد. بنابراین نیروی لیگاجور^۲ (قید تماس سیم و شیار براکت که زیر باله‌ها و روی سیم قرار می‌گیرد) بر روی سیم را می‌توان نیروی اصلی ایجاد اصطکاک در نظر گرفت.

تکو^۳ و همکارانش در سال ۲۰۰۹ در مطالعه‌ای به بررسی مقاومت در سیم‌های ارتودنسی با اندازه‌ها و مقاطع مختلف و براکت‌های ارتودنسی پرداختند. نتایج نشان داد زمانی که از زوج نیرو استفاده می‌شود، سیم با سطح مقطع گرد کمترین مقاومت اصطکاک را در مقایسه با سیم با سطح مقطع

مستطیلی نشان می‌دهد [۵].

همچنین نیرویی که در انتهای سیم موجب کشش سیم می‌شود به علت وجود انحنا در چیدمان دندان‌ها به دو مؤلفه عمودی و افقی تبدیل شده؛ که مؤلفه عمودی آن نیز بر اصطکاک تأثیر می‌گذارد [۶]. نتایج تحقیقات کوشی^۴ و همکارانش نشان داد رابطه‌ای معنادار بین نیروی مقاومت اصطکاک و خمیدگی سیم وجود دارد [۱]. این بدین معنی است که هرگاه خمیدگی افزایش یابد مقدار مؤلفه عمودی وارد بر سیم (N) در محل شیار براکت افزایش یافته و موجب افزایش اصطکاک می‌شود.

فرانک^۵ و همکارانش و همچنین سان‌کانگ^۶ و همکارانش در سال ۲۰۰۳ نشان دادند عامل دیگری که در افزایش اصطکاک مؤثر است، محل دقیق تماس سیم در دیواره شیار براکت است [۷، ۸]. اغلب در کاربرد بالینی موقعیت تماس در محل خروج سیم از شیار براکت در طرفین براکت به وجود می‌آید و موجب افزایش شدت توزیع تنش در این محدوده می‌شود. این عامل به دلیل مناسب نبودن زاویه تماس بحرانی انگولیشن^۷ (زاویه دوران براکت حول محور عمود بر سطح رویه دندان) است [۱]. به عبارت دیگر زمانی که سیم به لبه‌ها نیروی کمتری وارد می‌کند، مقدار نیروی عکس‌العمل از دیواره براکت (N) نیز کاهش یافته؛ این عامل باعث می‌شود که مقدار نیروی سیم روی دیواره شیار به صورت پراکنده توزیع شود. اما زمانی که زاویه تماس بحرانی انگولیشن افزایش می‌یابد، سیم ارتودنسی به لبه براکت نیروی عمودی بیشتری وارد کرد؛ موجب افزایش شدت توزیع تنش می‌شود. این حالت درست در زمانی رخ می‌دهد که زوج نیرو به براکت اعمال شود. بوکاسیو^۸ در سال ۲۰۱۳ به همین مسأله پرداخت و نتیجه گرفت براکت‌هایی که دارای لبه‌های تیزتر هستند باعث افزایش خمیدگی سیم در محل خروجی از شیار براکت می‌شوند و این عامل موجب ایجاد خراش در لبه‌ها می‌شود. در شکل (۱) تصاویر تهیه شده از SEM^۹، اثر سیم در لبه خروجی از شیار را نمایش می‌دهد.

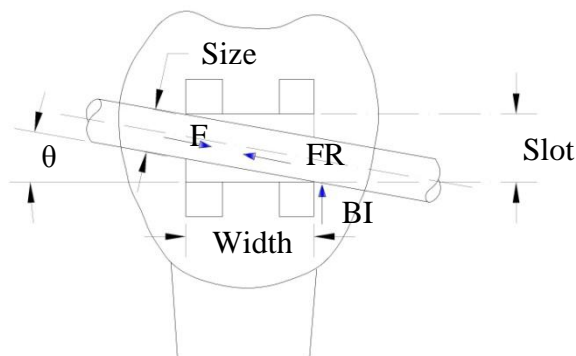
^۱Drescher^۵Frank^۹Scanning Electron Microscope^۲Ligature^۸Kang^۳Tecco^۷Angulation^۴Kusy^۶Boccaccio

دقت ۰/۰۵ میلی متر مدل سازی شد. اندازه مقطع براکت در ابعاد ۳×۲ میلی متر بود. براکت های با لبه باله گرد نیز با در نظر گرفتن محدودیت ها متناسب با براکت استاندارد طراحی و مدل سازی شدند. برای این منظور لبه براکت استاندارد را با دو لبه گرد به شعاع ۰/۲ و ۰/۳۵ میلی متر و براکت با باله استوانه ای به قطر ۰/۶ میلی متر طراحی شد.

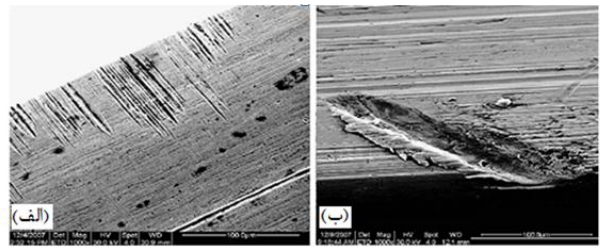
هندسه سیم ها با مقطع مستطیلی با ابعاد استاندارد ۰/۵۵۸۸ × ۰/۷۱۱۲ میلی متر (۰/۰۲۸" × ۰/۰۲۲") و مقطع دایره ای با قطر ۰/۵۵۸۸ میلی متر (۰/۰۲۲") و با توجه به انحنای چیدمان دندان ها مدل سازی شدند. زوایای تورک^{۱۰} و تیپ^{۱۱} (به ترتیب زاویه دوران حول محور موازی لبه دندان و زاویه دوران حول محور عمودی دندان) مورد نیاز در براکت ها در تمام طراحی ها لحاظ، و کف شیار براکت مطابق با انحنای سیم طراحی شده است. مدل سازی تمام هندسه ها با نرم افزار CATIA V5 R21 انجام شده است.

۲-۲- تعاریف هندسی مسأله

با توجه به هندسه نشان داده شده در شکل (۲)، زمانی که نیروی اعمالی به صورت منفرد باشد، زاویه θ کمتر از حد تماس بین دو باله می شود و نیروی اصطکاک فقط مخالف نیروی کشش سیم وارد می شود؛ اما اعمال زوج نیرو موجب می شود سیم ارتودنسی همیشه با دو باله در تماس باشد. در این حالت مقدار نیروی اصطکاک با نیروی حاصل از خمش در برابر نیروی کشش قرار می گیرد و تنش را بر دو باله اعمال می کند.



شکل (۲) - نمایش نیروهای وارده بر باله های براکت استاندارد [۸].



شکل (۱) - (الف) لبه خروجی سیم در براکت دامون، (ب) لبه خروجی سیم در براکت SmartClip [۱۰].

با توجه به هندسه براکت های موجود، عدم تعیین اندازه و جهت نیروی اصطکاک در آنها به صورت دقیق، موجب عدم پیش بینی صحیح درمان ارتودنسی می شود؛ در نتیجه نیاز به طراحی براکت بر مبنای کاهش اصطکاک، برای کاهش طول درمان، احساس می شود. لذا هدف این مطالعه بررسی و مقایسه مدل استاندارد و مدل براکت های با لبه گرد شده و مدل باله استوانه ای، از نظر اصطکاک سیم در بین شیار براکت و تعیین میزان کاهش اصطکاک در طراحی این نوع براکت است.

۲- روش تحقیق

۲-۱- مدل سازی هندسه مسأله

مدل سازی یکی از اجزای مهم در تحلیل های اجزای محدود به شمار می رود. برای انجام تحلیل های اجزای محدود به شبکه بندی هندسه موارد تحت مطالعه نیاز است که بر اساس ضرورت به یک بعدی، دو بعدی یا سه بعدی تقسیم بندی می شوند. از آنجایی که نیروهای وارد شده به سیستم در تحلیل اصطکاک محل تماس سیم و براکت در سه جهت، و همچنین هندسه براکت ها دارای انحناها و هندسه نامنظم هستند؛ لزوم مدل سازی به صورت سه بعدی ملموس است. از طرفی هر چه هندسه های طراحی شده به واقعیت نزدیک تر باشند، تحلیل های انجام شده با دقت بیشتری انجام می شوند. در این مطالعه مدل براکت موجود مهندسی معکوس شده؛ با سه حالت مدل های تغییر یافته مقایسه می شود.

در این تحقیق براکتی از نوع تجاری American Orthodontics® با دستگاه اسکن سه بعدی اندازه برداری شد. ابر نقاط اسکن شده از قطعه براکت دندان پیشین فک بالا با

¹⁰Torque

¹¹Tip

نیروی عمودی بر روی سیم در محل قرارگیری لیگچور براکت به مقدار $0.5N$ در دو طرف خروجی سیم از براکت در جهت عمود بر سطح رویه دندان قرار داده شد. قابل ذکر است که انتهای دیگر سیم و همچنین کف براکت - که بر روی دندان چسبانده می شود - ثابت در نظر گرفته شدند.

از آنجایی که مدل طراحی شده براکت های با باله استوانه ای و استاندارد دارای هندسه پیچیده و منحنی های بسیار کوچک (در برخی محدوده ها تا 0.05 میلی متر) است، در عمل جزء بندی مدل در مکان های کوچک، باریک شده و انحنای دارای شبکه ریزتر خواهد بود که موجب افزایش زمان حل می شود.

در این پژوهش سطوح تماس بین دو جسم بررسی و مطالعه شدند و به همین دلیل از شبکه بندی غیر ساختار یافته با اعمال کنترل شبکه بر روی نواحی خاصی از سطح تماس - که در تماس با سیم است - استفاده شد تا علاوه بر کاسته شدن حجم محاسبات غیر ضروری از دقت نتایج کاسته نشود. در این جزء بندی، از شبکه هرمی چهار وجهی غیر ساختار یافته و گسسته سازی مرتبه دوم^{۱۲} استفاده شد که برای پوشش دادن انحنای هندسه های پیچیده بسیار مناسب است.

در طی این بررسی با افزایش تراکم شبکه در محدوده سطوح تماس و کل مجموعه، به حداقل سازی خطای محاسبه پرداخته شد. بمنظور بررسی استقلال از شبکه، خطای 3% معیار مبنای قرار داده شد که با افزایش تدریجی اجزا و محاسبه مجدد، برای مدل مجموعه سیم و براکت استاندارد با تعداد 212354 جزء، مقدار خطا کمتر از 3% محاسبه شد.

شکل های (۳) و (۴) به ترتیب شبکه بندی مجموعه های سیم و براکت استاندارد، سیم و سیم و براکت استوانه ای را نشان می دهد. در ادامه توزیع تنش فون مایز^{۱۳} برای نواحی تماسی سیستم سیم و انواع براکت ارزیابی شدند.

معادله (۱) رابطه بین زاویه تماس بحرانی قرارگیری سیم با لقی مرتبه دوم را با سه مؤلفه هندسی زیر بیان می کند [۸]:

$$\cos \theta = \frac{size^2 - width^2}{(size)(slot) \pm \sqrt{(width)^2 - [(size)^2 + (slot)^2 + (width)^2]}} \quad (1)$$

در رابطه بالا، $size$ عرض سیم، $slot$ عرض شیار، $width$ پهناي طولی براکت را که سیم در آن درگیر است، نشان می دهد.

برای محاسبه زاویه تماس بحرانی و بیشترین زاویه چرخش انگولیشن، پس از مشخص کردن مقدار زاویه چرخش حول محور طولی سیم از معادله (۲) استفاده می شود [۸]:

$$\cos \theta = \frac{A^2 \cos^2 \phi - b^2 \cos^2 \phi}{A \cos \phi (a - B \sin \phi) \pm \sqrt{b^2 \cos^2 \phi - (A \cos \phi)^2 + (a - B \sin \phi)^2 + (b \cos \phi)^2}} \quad (2)$$

در معادله (۲)، A ارتفاع سیم، B پهناي سیم، a اندازه شیار براکت، b پهناي طولی براکت، θ زاویه تماس بحرانی و ϕ زاویه چرخش است.

هنگامی که زاویه چرخش انگولیشن به بیشترین حد خود برسد، مقدار زاویه تماس بحرانی معادل صفر می شود و معادله (۲) به صورت معادله (۳) بازنویسی می شود [۸]:

$$\cos \phi = \frac{a^2 - B^2}{Aa \pm \sqrt{B^2(-a^2 + A^2 + B^2)}} \quad (3)$$

در این معادله a اندازه شیار براکت، A ارتفاع سیم، B عرض سیم و ϕ زاویه چرخش انگولیشن است.

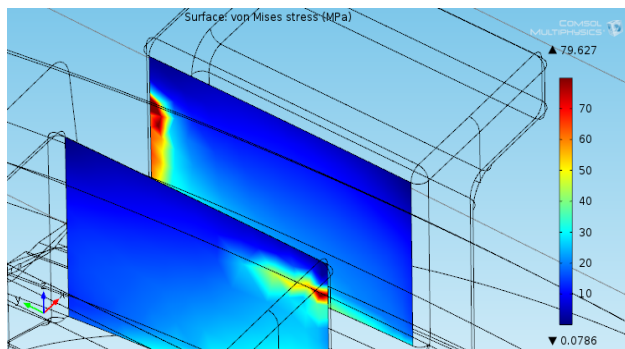
۲-۳- شبیه سازی عددی مسأله

هندسه های طراحی شده در نرم افزار COMSOL Multiphysics 4.3 وارد شدند. شرایط مرزی مناسب برای آنها در نظر گرفته شد. در نواحی تعامل سیم و براکت قید تماس اعمال شده است. برای اتصال بین دیواره ها و سیم، محل تماس بودن آنها با یکدیگر به عنوان محل تماس لحاظ شده است. مقدار نیرویی که در آزمایش های تجربی تاکنون استفاده شده است، مقادیر $10N$ [۱۰]، $1/5N$ [۶،۷] و $1N$ [۱۱] است. با توجه به اینکه هدف این تحقیق بررسی مقدار اصطکاک بین سیم و براکت است، سیم با نیروی کششی در انتهای سیم با اندازه $F_y = 1/5N$ و $F_z = 0.25N$ تحت کشش قرار گرفت. راستای y ، راستای سیم در شیار براکت و راستای z ، نیروی تجزیه شده در جهت انحنای فک است. همچنین دو

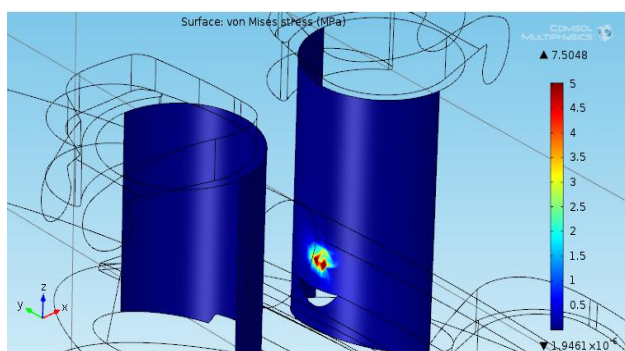
¹²Quadratic discretization

¹³Von Mises Stress

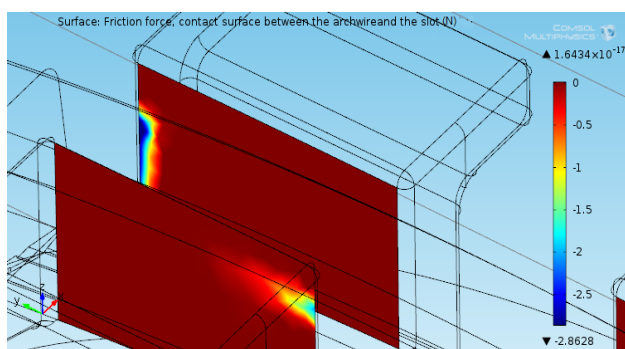
شده است. همان طور که در شکل مشاهده می‌شود، محل توزیع تنش بیشتر در بخش خروجی سیم از شیار براکت وجود دارد. شکل‌های (۷) و (۸) نیروی اصطکاک را در ناحیه تعامل سیم و براکت در حالت‌های مختلف نمایش می‌دهد.



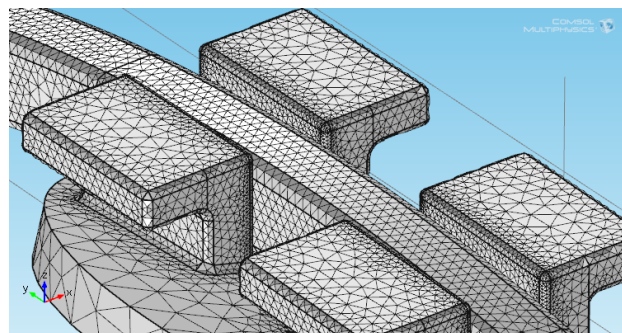
شکل (۵)- توزیع تنش در سطح تماس براکت استاندارد و سیم
مقطع مستطیلی



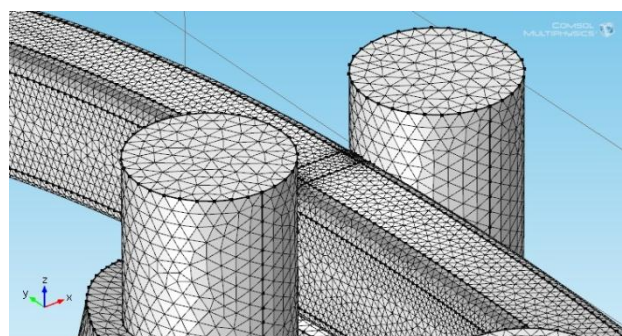
شکل (۶)- توزیع تنش سطح تماس براکت با باله استوانه‌ای و سیم
مقطع گرد



شکل (۷)- توزیع اصطکاک سطح تماس براکت استاندارد و سیم
مقطع مستطیلی



شکل (۳)- مدل شبکه‌بندی شده برای براکت استاندارد و سیم
مقطع مستطیلی



شکل (۴)- مدل شبکه‌بندی شده برای براکت با باله گرد و سیم
مقطع مستطیلی

۴-۲- ویژگی‌های مکانیکی

در این مطالعه، سیم و براکت به عنوان موادی با ویژگی‌های الاستیک خطی، همسانگرد و همگن از جنس استیل نوع AISI-316L در نظر گرفته شده‌اند. ضریب اصطکاک برای سطح تماس بین سیم و براکت مقدار ۰/۷۴ در نظر گرفته شده است [۱۲]. سایر خواص مکانیکی ماده در جدول (۱) آورده شده است.

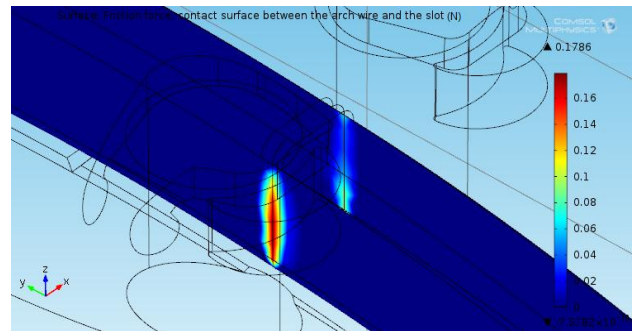
جدول (۱)- ویژگی‌های مکانیکی سیم و براکت

نوع ماده	مدول یانگ (GP)	ضریب پواسون	دانسیته (Kg/m ³)
Stainless Steel AI SI-۳۱۶L	۱۹۳	۰/۳	۷۸۵۰

۳- نتایج

در شکل‌های (۵) و (۶) توزیع تنش فون مایز برای هر یک از مدل‌ها در ناحیه تعامل بین سیم و براکت، نمایش داده

افزایش انحنای لبه، در هر دو نوع سیم مستطیلی و دایره‌ای کاهش می‌یابد به طوری که در براکت با باله استوانه‌ای حداقل تنش مشاهده می‌شود. در کاربرد بالینی معمولاً دندان بالاتر در موقعیتی از فک قرار می‌گیرد که موجب ایجاد خمش سیم، و عاملی برای ایجاد کرنش در سیم درون شیبار می‌شود. این خمش در طراحی هندسه مدل اعمال شده است و همین مسأله باعث شده است که افزایش شدت توزیع تنش در چهار محدوده شیبار براکت استاندارد به وجود آید. از این چهار محدوده، دو محدوده در باله‌های سمت راست در انتهای خروجی سیم و دو محدوده در قسمت خروجی میانی براکت به وجود آمده است. در شکل (۱۱) توزیع تنش به وجود آمده در چهار محدوده مذکور مشاهده می‌شود.

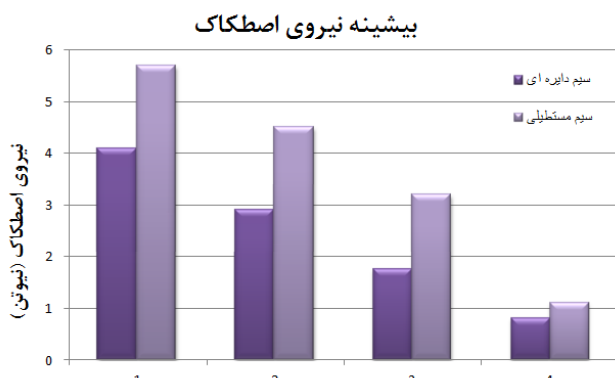


شکل (۸) - توزیع اصطکاک سطح تماس براکت با باله استوانه‌ای و سیم مقطع مستطیلی

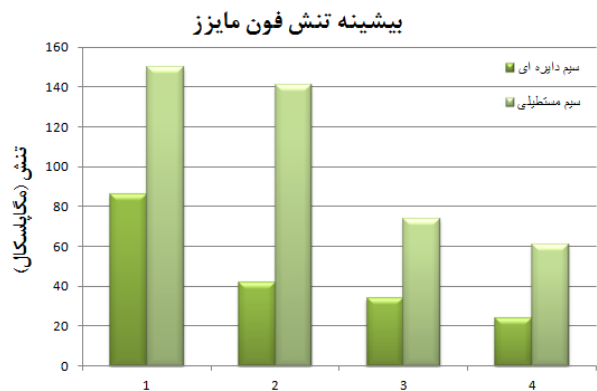
مطابق شکل‌های (۵)، (۶)، (۷) و (۸) حالت‌های مختلف شکل براکت با سیم‌های مقطع مستطیلی و دایره‌ای بررسی شدند و نتایج حاصل از آن در نمودار شکل‌های (۹) و (۱۰) ارائه شده است.

۴- بحث، تحلیل و مقایسه نتایج

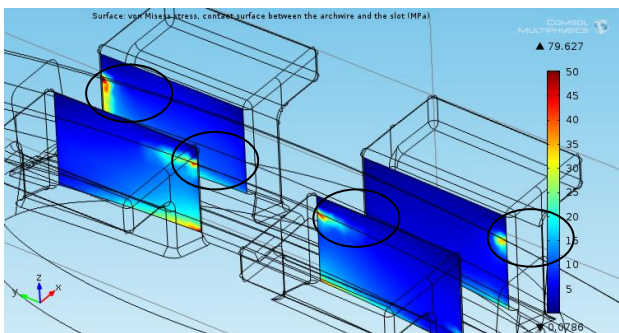
نمودار شکل (۹) مقدار تنش موجود در محل تماس براکت و سیم با مقطع مستطیلی و دایره‌ای را نشان می‌دهد.



شکل (۱۰) - اصطکاک ایجاد شده در سطح تماس سیم مستطیلی و براکت، (۱) براکت استاندارد با سیم مستطیلی، (۲) براکت با انحنای ۰/۲ میلی‌متر با سیم مستطیلی، (۳) براکت با انحنای ۰/۳۵ میلی‌متر با سیم مستطیلی، (۴) براکت با باله استوانه‌ای با سیم مستطیلی.



شکل (۹) - تنش ایجاد شده در سطح تماس سیم مستطیلی و براکت، (۱) براکت استاندارد با سیم مستطیلی، (۲) براکت با انحنای ۰/۲ میلی‌متر با سیم مستطیلی، (۳) براکت با انحنای ۰/۳۵ میلی‌متر با سیم مستطیلی، (۴) براکت با باله استوانه‌ای با سیم مستطیلی.



شکل (۱۱) - توزیع تنش در چهار محدوده لبه خروجی سیم از براکت

بررسی هندسه براکت‌ها با توجه به سطح تماس شیبار و براکت، اندازه‌های تجاری آنها و انتخاب مشخصات بهینه برای طراحی، از مسائل مهم در این زمینه هستند. آن‌گونه که در نمودار شکل (۹) مشاهده می‌شود مقدار تنش در براکت‌ها با

۵- نتیجه گیری

نتایج نشان داد که شدت توزیع تنش و اصطکاک در براکت‌های با لبه انحنای بیشتر در مقایسه با براکت‌های استاندارد کاهش قابل توجهی دارد. به خصوص این کاهش در براکت با لبه استوانه‌ای قابل ملاحظه است. همچنین استفاده از سیم مقطع دایره‌ای در کاهش اصطکاک تأثیرگذار است. در نهایت با توجه به کاهش اصطکاک در براکت‌های با لبه استوانه‌ای، طراحی این نوع براکت و استفاده از آن مناسب به نظر می‌رسد.

۶- مراجع

- [1] Burrow S.J., Friction and resistance to sliding in orthodontics: A critical review; American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics, 2009; 135: 442-447.
- [2] Ehsani S., Mandich M.A., El-Bialy T.H., Flores-Mir C., Frictional Resistance in Self-Ligating Orthodontic Brackets and Conventionally Ligated Brackets; The Angle Orthodontist, 2009; 79: 592-601.
- [3] Marangalou J.H., Ghalichi F., Mirzakouchaki B., Numerical simulation of orthodontic bone remodeling; Orthodontic Waves, 68: 64-71.
- [4] Drescher D., Bourauel C., Schumacher H.A., Frictional forces between bracket and arch wire; American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics, 1989; 96: 397-404.
- [5] Tecco S., Di Iorio D., Cordasco G., Verrocchi I., Festa F., Corrigendum An in vitro investigation of the influence of self-ligating brackets, low friction ligatures, and archwire on frictional resistance; Eur J Orthod, 2008; 30: 390-397.
- [6] Reznikov N., Har-Zion G., Barkana I., Abed Y., Redlich M., Measurement of friction forces between stainless steel wires and "reduced-friction" self-ligating brackets; American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics, 2010; 138: 330-338.
- [7] Frank C.A., Nikolai R.J., A comparative study of frictional resistances between orthodontic bracket and arch wire; American Journal of Orthodontics, 1980; 78: 593-609.
- [8] Kang B.S., Baek S.H., Mah J., Yang W.S., Three-dimensional relationship between the critical contact angle and the torque angle; American

روند کاهش تنش در براکت دارای انحنای بیشتر در مقایسه با براکت‌های استاندارد، نشان می‌دهد که طراحی براکت با لبه استوانه‌ای، با توجه به افزایش شدت توزیع تنش در دو محدوده لبه‌های مخالف هم، از مقدار کرنش در سیم می‌کاهد.

نمودار شکل (۹) همچنین نشان می‌دهند که شدت توزیع تنش در سیم‌های با مقطع دایره‌ای در مقایسه با سیم‌های مقطع مستطیلی کمتر است. سطح تماس سیم مستطیلی با یک نوع براکت بیشتر از سیم مقطع دایره‌ای در مقایسه با همان نوع براکت است؛ اما به دلیل سطح تماس بیشتر در لبه براکت، مقدار تنش در محدوده‌ها برای سیم مستطیلی افزایش می‌یابد.

نمودار شکل (۱۰) به ترتیب اصطکاک موجود در محل تماس براکت و سیم با مقطع مستطیلی و دایره‌ای را نشان می‌دهد. با کاهش سطح تماس و تغییر هندسه، انتظار می‌رود مقدار اصطکاک نیز کاهش یابد. مطابق آنچه در نمودار این شکل مشاهده می‌شود، اصطکاک در براکت استاندارد با سیم مقطع مستطیلی به دلیل داشتن سطح تماس گسترده با دیواره شیار براکت برخلاف سیم مقطع دایره‌ای - که سطح تماس باریکی در راستای طولی دیواره شیار دارد - زیاد است. همچنین مقدار اصطکاک در براکت‌های دیگر با افزایش انحنای لبه در مقایسه با براکت استاندارد نیز کاهش قابل ملاحظه‌ای دارد. بیشترین کاهش اصطکاک در براکت با لبه‌های استوانه‌ای است؛ زیرا در براکت‌های با لبه استوانه‌ای سطح تماس سیم با لبه‌های براکت - که در شکل‌های (۶) و (۸) نمایش داده شد - بسیار کوچکتر از سطح تماس در براکت استاندارد است. نتایج نمودار شکل (۱۰) همچنین نشان می‌دهد، هنگامی که از سیم با مقطع دایره‌ای استفاده می‌شود، اصطکاک با افزایش انحنای لبه براکت کاهش می‌یابد. با افزایش انحنای لبه براکت، سطح تماس سیم دایره‌ای با براکت از یک خط به یک نقطه میل می‌کند که این عامل موجب کاهش سطح تماس بین سیم و براکت می‌شود و به همین دلیل مقدار نیروی اصطکاک ایجاد شده در این نوع براکت کاهش یافته است. این نمودار همچنین نشان می‌دهد که مقدار اصطکاک در سیم دایره‌ای کمتر از سیم مستطیلی است.

- Orthodontics and Dentofacial Orthopedics, 2008; 133: 87-90.
- [11] Bednar J.R., Gruendeman G.W., Sandrik J.L., A comparative study of frictional forces between orthodontic brackets and arch wires; American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics, 1991; 100: 513-522.
- [12] Lancaster J.K., ASM handbook, volume 18, friction, lubrication and wear technology: Volume chairman, Peter J. Blau; Tribology International, 1993; 26: 293-294.
- Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics, 2003; 123: 64-73.
- [9] Boccaccio A., Friction Forces during Sliding of Various Brackets for Malaligned Teeth: An In Vitro Study; The Scientific World Journal, 2013; Article ID 871423, 11 pages.
- [10] Franchi L., Baccetti T., Camporesi M., Barbato E., Forces released during sliding mechanics with passive self-ligating brackets or nonconventional elastomeric ligatures; American Journal of