

تحلیل سیستم نیروی سه بعدی در فنرهای رترکشن پیش فعال شده از جنس استیل و بتا تیتانیوم به روش المان محدود

دکتر شیوا علوی^۱، دکتر امین شیروانی*

چکیده

مقدمه: هدف پژوهش حاضر، بررسی اثرات مستقل و متقابل خم‌های پیش فعال سازی نوع اول و دوم بر سیستم سه بعدی نیرو در فنرهای رترکشن کائین از جنس استیل و بتا تیتانیوم بود.

* دستیار تخصصی ارتودنسی، دانشکده دندان پزشکی، بخش ارتودنسی، دانشگاه علوم پزشکی اصفهان (مؤلف مسؤول)
shirvani@dent.mui.ac.ir

مواد و روش‌ها: در یک پژوهش تحلیل المان محدود، سه طرح فنر رترکشن شامل فنر عمودی، فنر عمودی هلیکس دار و فنر T مورد بررسی قرار گرفت. تمامی حالات ترکیبی از خم نوع اول (،، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درجه)، خم نوع دوم (،، ۲۰ و ۴۰ درجه) و آلیاژ سیم (استیل/ بتا تیتانیوم) برای هر یک از فنرهای مذکور بررسی گردید. تمامی اپلاینس‌های مورد بررسی با فواصل ۰/۰۵ میلی‌متری تا حد الاستیک فعال شدند و نسبت‌های گشتاور به نیرو (در پلن اکلوزال و ساژیتال) و نسبت نیرو/ تغییر شکل آنها با کاربرد نرم‌افزارهای ABAQUS (نسخه ۶٫۸) و CATIA (نسخه ۵٫۱۳) محاسبه گردید.

۱: دانشیار، دانشکده دندان پزشکی، بخش ارتودنسی، دانشگاه علوم پزشکی اصفهان

طرح تحقیقاتی به شماره: ۳۸۷۰۹۴، سال ۱۳۸۷، معاونت پژوهشی دانشگاه علوم پزشکی اصفهان

یافته‌ها: بر اساس یافته‌های پژوهش، خم نوع دوم تا حدی باعث کاهش نسبت گشتاور/ نیرو در پلن اکلوزال می‌گردد ولی خم نوع اول اثری بر نسبت گشتاور به نیروی فنر در پلن ساژیتال ندارد. افزودن هلیکس به فنر عمودی باعث کاهش نسبت نیرو/ تغییر شکل فنر می‌شود ولی اثر کمی بر نسبت‌های گشتاور به نیروی فنر دارد.

این مقاله در تاریخ ۸۷/۹/۲۴ به دفتر مجله رسیده، در تاریخ ۸۷/۱۱/۲۷ اصلاح شده و در تاریخ ۸۷/۱۲/۲۰ تأیید گردیده است.

نتیجه‌گیری: پیش فعال سازی‌های نوع اول و دوم در فنرهای رترکشن باعث ایجاد اثرات مطلوب شده، تداخل نامطلوبی با یکدیگر ندارند. افزودن هلیکس ممکن است باعث بهبود برخی از خصوصیات مکانیکی فنرهای رترکشن گردد.

مجله دانشکده دندان پزشکی اصفهان
۱۳۸۸؛ ۱(۱): ۱۳ تا ۲۳

کلید واژه‌ها: طرح اپلاینس ارتودنسی، سیم‌های ارتودنسی، تحلیل المان محدود، استیل ضد زنگ، بتا تیتانیوم، حرکت دندان.

مقدمه

بستن فضا یکی از پایه‌ای‌ترین حرکات دندان‌های ارتودونتیکی محسوب می‌گردد. این حرکت دندان‌ها به طور معمول نیازمند درجاتی از حرکت انتقالی دندان‌ها می‌باشد و موفقیت در این مرحله از درمان مستلزم کنترل هرچه کاملتر مرکز چرخش دندان با اعمال یک سیستم بیومکانیک مطلوب است. بستن فضا به طور معمول به دو روش اسلایدینگ و سگمنتال صورت می‌گیرد. در مکانیک اسلایدینگ، حرکت دندان‌ها به واسطه حرکت براکت متصل به دندان بر روی آرچ وایر شکل داده می‌شود و یا حرکت آرچ وایر از درون براکت‌ها و تیوب‌ها انجام می‌گردد. غلبه بر عامل اصطکاک بین سیم و براکت و کنترل عوامل متعدد مؤثر بر آن، از مهمترین ملاحظات کاربرد مکانیک اسلایدینگ است. غلبه بر اصطکاک نیازمند اعمال نیروی رترکشن بیش از نیروی بهینه است. عکس‌العمل چنین نیرویی باعث اعمال نیروی بیشتر بر واحد انکوریج و افزایش احتمال از دست رفتن انکوریج می‌گردد. در مکانیک سگمنتال، حرکت دندان‌ها بدون عامل اصطکاک و از طریق اعمال یک سیستم نیروی کنترل شده سه بعدی با کاربرد فنرهای رترکشن اختصاصی شده صورت می‌گیرد. حذف عامل اصطکاک در این مکانیک باعث حفظ سطح پایدارتری از استرس در لیگامان پرپودونتال و حرکت یکنواخت تر دندان نسبت به مکانیک اسلایدینگ می‌گردد.

علاوه بر کنترل مرکز چرخش دندان، اعمال استرس بهینه در لیگامان پرپودونتال و حفظ سطح به نسبت ثابت از استرس حین حرکت دندان‌ها از دیگر خصوصیات سیستم بیومکانیک مطلوب هستند. ایجاد استرس بهینه در لیگامان پرپودونتال و ثبات نیروی رترکشن حین حرکت دندان‌ها، مستلزم کاربرد فنرهایی با LDR کم است. با ارایه آلیاژ بتا تیتانیوم، ساخت فنرهای رترکشن با LDR و پیچیدگی ژئومتریکی کم میسر شد، اما کاهش LDR با کاهش نسبت گشتاور به نیرو در هر دو پلن ساژیتال و اکلوژال همراه است. بر اساس نتایج پژوهش Raboud و همکاران [۱]، فنر عمودی هلیکس‌دار استیل با پیش فعال سازی نوع اول ۲۰ درجه‌ای در یک دوم حداکثر فعال سازی، نسبت گشتاور به نیروی ۱/۵۹ میلی‌متر در پلن اکلوژال دارد؛ حال آن که این نسبت در فنر عمودی هلیکس‌دار

بتا تیتانیومی ۰/۳۹ میلی‌متر است. با توجه به این که نسبت گشتاور به نیروی لازم برای ممانعت از چرخش دندان ۳/۵ میلی‌متر است، فنر عمودی هلیکس‌دار بتا تیتانیوم با پیش فعال سازی نوع اول ۲۰ درجه‌ای فاقد کفایت لازم برای ممانعت از چرخش دندان است [۱]. از این رو کاربرد آلیاژ بتا تیتانیوم در فنرهای رترکشن باید با اعمال خم‌های پیش فعال سازی شدیدتر همراه باشد. چنین فنرهایی در حین جایگذاری دچار تغییرات ژئومتری شدیدتری شده، در چنین شرایطی اثرات متقابل نامطلوب خم‌های نوع اول و دوم محتمل به نظر می‌رسد.

در بررسی اثرات متقابل پیش فعال سازی نوع اول و نوع دوم، Katona و همکاران [۲] اثرات مستقل و متقابل خم‌های نوع اول و دوم را بر نسبت گشتاور به نیرو در پلن ساژیتال در فنر سه ضلعی (Triangular) استیل مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج این پژوهش تجربی، خم‌های پیش فعال سازی نوع اول و نوع دوم اثرات مطلوب و مستقل از یکدیگر دارند. پیش‌تر نیز Raboud و همکاران [۳] فنر چهارگوش فعال شده در جهت عمودی را مورد بررسی قرار دادند. این فنر جهت اصلاح موقعیت سه بعدی دندان به کار می‌رود و فنر رترکشن محسوب نمی‌گردد. نتایج این پژوهش نشان داد که سیستم نیروی ناشی از خم نوع دوم مستقل از خم نوع اول می‌باشد.

در پژوهش Chen و همکاران [۴] نیز پژوهشگران اثر ژئومتری فنر T استیل را بر سیستم نیروی اعمال شده در پلن ساژیتال بررسی نمودند. بر اساس نتایج این پژوهش، افزایش بعد عرضی فنر T باعث کاهش LDR فنر می‌شود، اما این اثر مطلوب با کاهش نسبت گشتاور به نیرو در پلن ساژیتال همراه است. نتایج مشابهی نیز در پژوهش Thiesen و همکاران [۵] گزارش شده است، به نحوی که افزودن هلیکس به فنر T با کاهش LDR و نیز کاهش نسبت گشتاور به نیرو در پلن ساژیتال همراه بوده است.

بر اساس نتایج این پژوهش‌ها به نظر می‌رسد که کاربرد آلیاژ بتا تیتانیوم با ضریب کشسانی کم در فنرهای رترکشن در مقایسه با آلیاژ استیل ممکن است باعث عدم کارایی فنرهای بتا تیتانیومی در حفظ موقعیت دندان در پلن اکلوژال گردد. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف مقایسه سیستم نیروی سه بعدی فنرهای رترکشن استیل و بتا تیتانیوم با ژئومتری‌های مشابه و با

تحلیل سیستم نیروی سه بعدی در فنرهای رترکشن

دکتر شیوا علوی و همکار

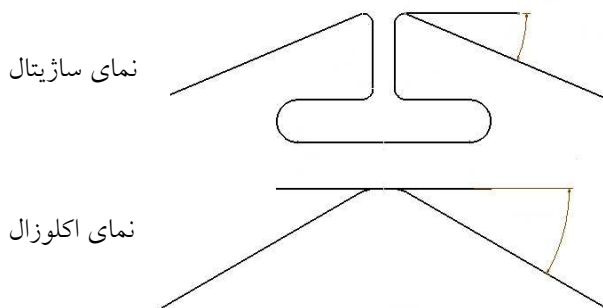
پیش فعال سازی نوع اول و دوم طراحی گردید. در این پژوهش، اثرات مستقل و متقابل خم‌های پیش فعال سازی نوع اول و دوم در فنرهای رترکشن عمودی، عمودی هلیکس دار و فنر T از جنس استیل و بتا تیتانیوم بررسی و مقایسه شد.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر، پژوهشی تحلیلی به روش المان محدود غیر خطی است. این روش، تحلیل فنرهای رترکشن با تغییر شکل‌های وسیع و نیز تحلیل رفتار پلاستیک اپلاینس تحت بارگذاری را میسر می‌سازد.

مدل‌های مورد بررسی شامل ۳ طرح فنر رترکشن بود. مدل سازی فنرهای مورد بررسی با کاربرد نرم‌افزار CATIA (نسخه ۵،۱۳) صورت گرفت. ابعاد فنرهای مورد بررسی به شرح زیر است.

فنر عمودی (Vertical loop) با ارتفاع عمودی ۸ میلی‌متر و لوپ تحتانی به قطر ۲ میلی‌متر (شکل ۱).
فنر عمودی هلیکس دار (Vertical helical loop) با ارتفاع عمودی ۸ میلی‌متر و یک هلیکس به قطر ۲ میلی‌متر (شکل ۲).
فنر T با بعد ژئزیوالی ۱۰ میلی‌متر، ارتفاع ۶ میلی‌متر، فاصله بین پایه‌های عمودی یک میلی‌متر و لوپ‌های طرفی به قطر ۲ میلی‌متر (شکل ۳).

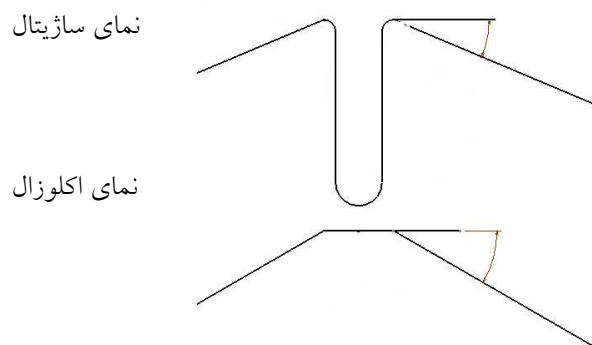


شکل ۳. نمای فنر T

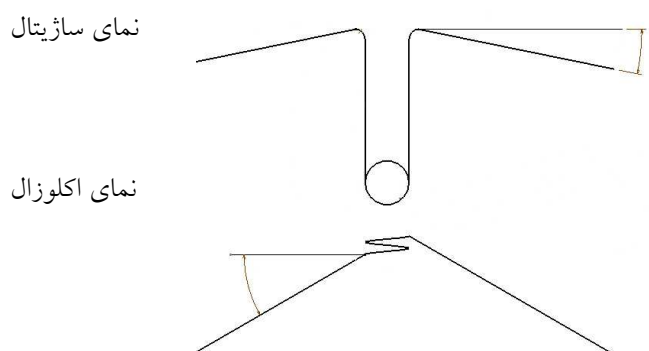
فنرهای رترکشن مورد بررسی با سیم‌های بتا تیتانیوم و استیل ضدزنگ با ابعاد 0.022×0.016 اینچ شبیه‌سازی شدند. ضریب کشسانی و نقطه تسلیم برای بتا تیتانیوم به ترتیب 70 و 1010 MPa و برای استیل ضدزنگ به ترتیب 170 GPa و 1640 MPa در نظر گرفته شد. ضریب پویسون بتا تیتانیوم و استیل ضدزنگ نیز به ترتیب 0.31 و 0.3 لحاظ گردید [۸-۶].

در هر یک از فنرهای مورد بررسی، خم‌های نوع دوم صفر، 20 و 40 درجه اعمال شد (صفر، 10 و 20 درجه در هر یک از پایه‌های قدامی و خلفی) و به ازای هر یک از زوایای فوق نیز خم‌های نوع اول صفر، 20 و 40 و 60 درجه اعمال گردید (صفر، 10 ، 20 ، 30 در هر نیمه فنر). در بخش نتایج، مقادیر پیش فعال سازی نوع اول و دوم در هر فنر به صورت (m, n) گزارش شده به طوری که m بیانگر مقدار خم نوع دوم و n بیانگر مقدار خم نوع اول است.

فنرهای مورد بررسی در ابتدا بدون بارگذاری محوری به موقعیت خنثی (Neutral Position) در آمدند. در موقعیت



شکل ۱. نمای فنر عمودی



شکل ۲. نمای فنر عمودی هلیکس دار

یافته‌ها

سیستم نیروی فنر T بدون پیش فعال سازی به روش المان محدود غیرخطی محاسبه و نتایج حاصل از آن با نتایج پژوهش‌های تجربی و تحلیلی Faulkner مقایسه گردید. انحراف نیروی رترکشن و گشتاور محاسبه شده به روش المان محدود غیر خطی (روش پژوهش حاضر) نسبت به روش تجربی Faulkner به ترتیب ۶/۵۲ - تا ۲/۳۶ درصد و ۷/۵۶ - تا ۶/۴۸ درصد بود.

سیستم نیروی فنرهای استیل و بتا تیتانیوم مورد بررسی در حداکثر فعال سازی و نیز در یک دوم حداکثر فعال سازی فنر در جدول‌های ۱ و ۲ آمده است.

اثر پیش فعال سازی نوع دوم برنسبت گشتاور به نیرو (M_z/F_x) در شکل ۴ نشان داده شده است. بر این اساس، نسبت گشتاور ذاتی فنر (Inherent moment) به نیروی رترکشن با افزایش فعال سازی فنر تغییر قابل ملاحظه‌ای نمی‌کند. با اعمال پیش فعال سازی نوع دوم، نسبت M_z/F_x افزایش می‌یابد. در این حالت با افزایش فعال سازی فنر، نسبت M_z/F_x پس از یک افت شدید به نسبت ثابت می‌گردد. شکل ۵ اثر پیش فعال سازی نوع اول بر نسبت گشتاور به نیرو در پلن اکوزال (M_y/F_x) را نشان می‌دهد. همان طور که در جدول‌های ۱ و ۲ مشاهده می‌شود، در صورت عدم اعمال این پیش فعال سازی، M_y در تمامی مقادیر فعال سازی صفر خواهد بود.

شکل‌های ۶ و ۷ اثرات متقابل خم‌های نوع اول و دوم را نشان می‌دهند. بر این اساس، اعمال خم نوع اول بر نسبت M_z/F_x تأثیر چندانی ندارد (شکل ۶)، ولی اعمال خم نوع دوم باعث کاهش مختصر نسبت M_y/F_x می‌گردد (شکل ۷).

اثر هلیکس بر سیستم نیروی فنر عمودی در شکل‌های ۸ و ۹ آمده است. بر این اساس، کاربرد هلیکس در طرح فنر عمودی موجب افزایش نسبت‌های M_y/F_x و M_z/F_x می‌گردد. علاوه بر این، کاربرد هلیکس با کاهش LDR فنر و افزایش حداکثر فعال سازی فنر گزارش شده است.

خنثی، دو انتهای فنر (محل فرضی براکت‌ها) به حالت موازی و در یک امتداد قرار گرفته، نیروی افقی صفر می‌باشد. بارگذاری با فواصل ۰/۰۵ میلی‌متر تا حداکثر فعال سازی فنر انجام شد. تغییر شکل پلاستیک در حداقل یکی از المان‌های بیم (Beam element) به عنوان حداکثر فعال سازی فنر تعریف شد. متغیرهای مورد بررسی شامل مؤلفه‌های نیرو (F) و گشتاور زوج نیرو (M) در دو انتهای آلفا و بتای فنر در سه راستای x (مزبودیستال)، y (اکلوزوژنژیوال) و z (باکولینگیوال) بود.

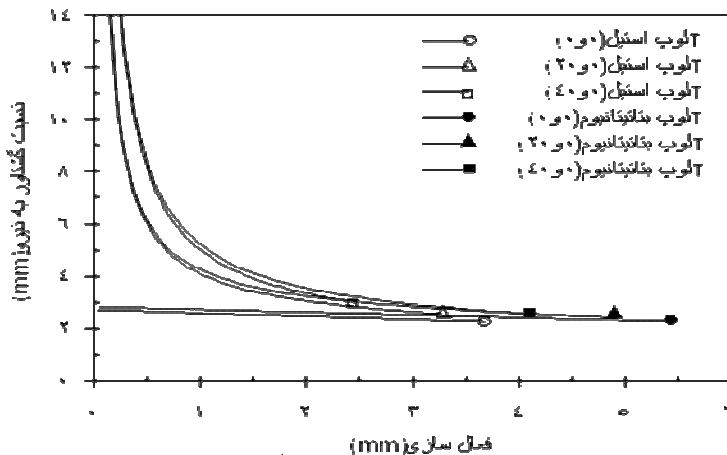
فاصله بین براکتی، ۲۱ میلی‌متر در حداکثر فعال سازی فنر در نظر گرفته شد. بر این اساس، طول اولیه فنرها باید به گونه‌ای محاسبه شود که پس از بارگذاری فنر تا حد الاستیک، طول فنر به ۲۱ میلی‌متر برسد. بدین منظور طول اولیه فنرهای رترکشن قبل از اعمال خم‌های نوع اول و دوم در فنرهای استیل ۲۰ میلی‌متر و در فنرهای بتا تیتانیوم ۱۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد. پس از اعمال خم‌های نوع اول و دوم، بارگذاری فنرها مطابق شرایط فوق انجام و فنر تا حداکثر فعال سازی بارگذاری شد. در حداکثر فعال سازی، فاصله دو انتهای آلفا و بتا محاسبه شد و از ۲۱ میلی‌متر کسر گردید. طول اولیه فنر بر این مبنا اصلاح شد به طوری که چنانچه تفاضل مذکور منفی بود، طول اولیه فنر به طور قرینه به مقدار تفاضل مذکور کاهش می‌یافت و چنانچه تفاضل مثبت بود مقدار تفاضل به طول اولیه فنر افزوده می‌شد.

تحلیل المان محدود توسط نرم‌افزار ABAQUS (نسخه ۶,۸) انجام شد. برای اعتبار سنجی روش پژوهش، فنر T با طول مزبودیستالی ۷ میلی‌متر، بعد ژنژیوالی ۱۱ میلی‌متر، ارتفاع ۶ میلی‌متر، فاصله بین پایه‌های عمودی ۲ میلی‌متر و لوپ‌های طرفی به قطر ۲ میلی‌متر از جنس سیم استیل ۰/۲۲ × ۰/۱۶ میلی‌متر، اینچ تا ۲ میلی‌متر با فواصل ۰/۲۵ میلی‌متر بارگذاری شد و یافته‌های حاصل با نتایج پژوهش آنالیز المان محدود Faulkner در پژوهش تجربی وی و همکاران [۷] مقایسه شد.

یافته‌های تحلیل المان محدود با کاربرد نرم افزار EXCEL (نسخه ۲۰۰۷) در قالب جداول و نمودارهای نیرو، نسبت گشتاور به نیرو در پلن‌های ساژیتال و اکلوزال برحسب مقادیر فعال سازی فنر گزارش شده است.

جدول ۱. سیستم نیروی سه بعدی فنرهای رترکشن استیل

LDR	حداکثر فعال سازی			$\frac{1}{2}$ حداکثر فعال سازی			حداکثر فعال سازی mm	خم نوع دوم	خم نوع اول	طرح فنر
	M'_y/F_x	M'_z/F_x	F_x	M'_y/F_x	M'_z/F_x	F_x				
N/mm	mm	Mm	N	Mm	mm	N				
۲/۳۱	.	۱/۷۶	۴/۶۱	.	۱/۹۶	۲/۱۹	۲/۰۰	.	.	لوپ عمودی
۲/۲۹	۱/۱۵	۱/۷۷	۵/۲۸	۲/۵۲	۱/۹۶	۲/۵۴	۲/۳۱	.	۲۰	
۲/۲۵	۲/۲۵	۱/۸۱	۵/۳۶	۴/۹۸	۲/۰۰	۲/۵۸	۲/۳۸	.	۴۰	
۲/۱۸	۴/۲۹	۱/۹۲	۴/۲۰	۹/۲۷	۲/۰۹	۲/۰۵	۱/۹۳	.	۶۰	
۲/۴۲	.	۲/۴۴	۵/۶۷	.	۳/۷۲	۲/۶۸	۲/۳۴	۲۰	.	
۲/۵۱	.	۳/۰۶	۵/۷۴	.	۵/۲۷	۲/۷۴	۲/۲۹	۴۰	.	
۲/۴۲	-۰/۹۷	۲/۴۲	۵/۸۷	۲/۲۱	۳/۶۶	۲/۷۹	۲/۴۳	۲۰	۲۰	
۲/۳۸	۴/۷۲	۵/۵۳	۲/۴۱	۹/۸۹	۹/۹۲	۱/۲۰	۱/۰۱	۴۰	۴۰	
۱/۶۶	-۰/۳۱	۲/۳۴	۵/۳۵	-۰/۳۶	۲/۷۰	۲/۴۴	۳/۲۲	.	.	لوپ عمودی
۱/۶۹	-۰/۵۲	۲/۳۳	۶/۰۸	۱/۶۰	۲/۷۱	۲/۷۶	۳/۵۹	.	۲۰	هلیکس دار
۱/۶۲	۱/۷۱	۲/۴۱	۴/۹۷	۴/۳۶	۲/۷۵	۲/۲۸	۳/۰۷	.	۴۰	
۱/۵۲	۳/۷۲	۲/۵۶	۳/۷۵	۸/۸۲	۲/۸۵	۱/۷۵	۲/۴۶	.	۶۰	
۱/۶۷	-۰/۳۰	۲/۸۸	۵/۹۷	-۰/۳۶	۴/۱۹	۲/۷۲	۳/۵۷	۲۰	.	
۱/۶۲	-۰/۳۱	۳/۸۵	۴/۶۱	-۰/۳۷	۶/۳۲	۲/۱۶	۲/۸۵	۴۰	.	
۱/۶۱	-۰/۶۶	۳/۱۱	۴/۸۱	۱/۹۳	۴/۵۳	۲/۲۳	۲/۹۹	۲۰	۲۰	
۱/۵۴	۳/۱۱	۵/۲۳	۲/۶۸	۷/۲۶	۸/۹۰	۱/۲۹	۱/۷۴	۴۰	۴۰	
۱/۹۰	.	۲/۲۴	۷/۰۲	.	۲/۴۷	۳/۵۹	۳/۶۹	.	.	T فنر
۱/۸۹	-۰/۶۸	۲/۲۶	۶/۴۹	۱/۵۸	۲/۴۸	۳/۳۱	۳/۴۴	.	۲۰	
۱/۸۵	۱/۷۲	۲/۳۳	۵/۴۰	۳/۸۹	۲/۵۴	۲/۷۴	۲/۹۲	.	۴۰	
۱/۷۷	۳/۵۵	۲/۴۶	۴/۱۱	۷/۷۰	۲/۶۴	۲/۱۰	۲/۳۲	.	۶۰	
۲/۰۴	.	۲/۵۵	۶/۶۶	.	۳/۳۱	۳/۴۵	۳/۲۷	۲۰	.	
۲/۲۹	.	۳/۰۱	۵/۶۳	.	۴/۴۲	۲/۹۳	۲/۴۶	۴۰	.	
۲/۰۴	-۰/۷۹	۲/۷۰	۵/۴۶	۱/۸۰	۳/۵۱	۲/۸۰	۲/۶۸	۲۰	۲۰	
۲/۳۱	۲/۶۸	۳/۹۰	۳/۳۹	۵/۸۱	۶/۱۵	۱/۷۳	۱/۴۷	۴۰	۴۰	



شکل ۴. اثر پیش فعال سازی نوع دوم بر نسبت M'_z/F_x فنر T

جدول ۲. سیستم نیروی سه بعدی فنرهای رترکشن بتاتینانوم

LDR	حداکثر فعال سازی			$\frac{1}{2}$ حداکثر فعال سازی			حداکثر فعال سازی mm	خم نوع دوم	خم نوع اول	طرح فنر
	M_y/F_x	M_z/F_x	F_x	M_y/F_x	M_z/F_x	F_x				
N/mm	mm	Mm	N	Mm	mm	N				
۱/۰۱	۰	۱/۶۶	۲/۹۳	۰	۱/۹۴	۱/۳۵	۲/۹۱	۰	۰	لوپ عمودی
۱/۰۲	-۰/۷۶	۱/۶۶	۳/۲۳	۱/۷۷	۱/۹۵	۱/۵۰	۳/۱۸	۰	۲۰	
۱/۰۱	۱/۳۷	۱/۶۸	۳/۵۵	۳/۱۹	۱/۹۸	۱/۶۶	۳/۵۲	۰	۴۰	
۰/۹۹	۲/۱۰	۱/۷۴	۳/۴۵	۴/۸۹	۲/۰۴	۱/۶۲	۳/۴۹	۰	۶۰	
۱/۰۵	۰	۲/۰۹	۳/۴۰	۰	۳/۱۷	۱/۵۷	۳/۲۴	۲۰	۰	
۱/۰۹	۰	۲/۳۱	۳/۸۷	۰	۳/۹۵	۱/۷۹	۳/۵۴	۴۰	۰	
۱/۰۵	-۰/۶۱	۲/۰۳	۳/۷۰	۱/۴۷	۳/۰۵	۱/۷۲	۳/۵۲	۲۰	۲۰	
۱/۰۵	۱/۵۶	۲/۷۷	۲/۷۶	۳/۶۳	۴/۷۶	۱/۳۱	۲/۶۳	۴۰	۴۰	
۰/۷۷	-۰/۲۷	۲/۱۸	۳/۵۵	-۰/۳۴	۲/۶۹	۱/۵۳	۴/۶۰	۰	۰	لوپ عمودی
۰/۸۹	-۰/۲۰	۲/۰۶	۴/۳۷	-۰/۸۷	۲/۶۵	۱/۸۳	۴/۹۲	۰	۲۰	هلیکس دار
۰/۷۶	-۰/۸۷	۲/۲۲	۳/۵۰	۲/۵۹	۲/۷۴	۱/۵۱	۴/۵۹	۰	۴۰	
۰/۷۲	۱/۷۴	۲/۳۴	۲/۹۸	۴/۷۲	۲/۸۲	۱/۳۱	۴/۱۲	۰	۶۰	
۰/۷۷	-۰/۲۶	۲/۴۷	۳/۹۴	-۰/۳۴	۳/۶۷	۱/۷۰	۵/۱۲	۲۰	۰	
۰/۷۳	-۰/۲۷	۲/۹۵	۳/۳۲	-۰/۳۴	۴/۸۱	۱/۴۹	۴/۵۶	۴۰	۰	
۰/۷۴	-۰/۲۶	۲/۵۸	۳/۴۲	۱/۰۴	۳/۸۰	۱/۵۰	۴/۶۲	۲۰	۲۰	
۰/۶۹	۱/۱۳	۳/۳۸	۲/۴۲	۳/۱۸	۵/۵۳	۱/۱۱	۳/۵۱	۴۰	۴۰	
۰/۷۹	۰	۲/۲۵	۴/۲۶	۰	۲/۵۴	۲/۲۱	۵/۴۰	۰	۰	T فنر
۰/۷۹	-۰/۴۱	۲/۲۶	۳/۹۹	۱/۰۲	۲/۵۵	۲/۰۶	۵/۰۸	۰	۲۰	
۰/۷۷	-۰/۹۵	۲/۳۱	۳/۵۶	۲/۳۲	۲/۵۸	۱/۸۳	۴/۶۲	۰	۴۰	
۰/۷۵	۱/۶۶	۲/۴۰	۳/۱۶	۳/۹۸	۲/۶۷	۱/۶۲	۴/۲۴	۰	۶۰	
۰/۸۳	۰	۲/۴۱	۴/۰۶	۰	۳/۰۳	۲/۱۴	۴/۹۰	۲۰	۰	
۰/۹۰	۰	۲/۵۵	۳/۶۷	۰	۳/۵۲	۱/۹۶	۴/۰۷	۴۰	۰	
۰/۸۳	-۰/۴۲	۲/۴۵	۳/۵۷	۱/۰۵	۳/۱۱	۱/۸۶	۴/۳۰	۲۰	۲۰	
۰/۹۱	۱/۱۰	۲/۷۹	۲/۸۰	۲/۶۰	۴/۰۰	۱/۴۷	۳/۰۸	۴۰	۴۰	

بحث

نتایج پژوهش است. مقدار انحراف مقادیر نیرو و گشتاور محاسبه

شده در پژوهش حاضر بین $-۷/۵۶$ تا $۶/۴۸$ درصد می باشد. پیشتر، Faulkner و همکاران [۷] خطای نسبی روش المان محدود غیر خطی نسبت به روش تجربی را در محدوده ۱۵ درصد گزارش کرده است. Mazza و همکاران [۱۱، ۱۰] نیز حداکثر انحراف مقادیر به دست آمده با روش المان محدود غیر خطی را نسبت به روش تحلیلی ۱۸ درصد گزارش کرده اند. Lipsett و همکاران [۱۲] نیز جهت اعتبارسنجی روش تحلیلی سگمنتال سیستم نیروی حاصل از فنر T پیش فعال شده از

همان طور که پیشتر گفته شد، جهت اعتبار سنجی روش تحلیلی پژوهش حاضر مقادیر نیرو و گشتاور حاصل از فعال سازی فنر T با مشخصات ژئومتریک ذکر شده در بخش مواد و روش ها به روش المان محدود غیر خطی محاسبه و مقادیر به دست آمده با مقادیر حاصل از پژوهش های تحلیلی - تجربی Faulkner و همکاران و Koenig و همکاران [۹، ۷] مقایسه گردید. توافق قابل توجه روش المان محدود به کار رفته در پژوهش حاضر با پژوهش تحلیلی - تجربی Faulkner، بیانگر اعتبار قابل قبول

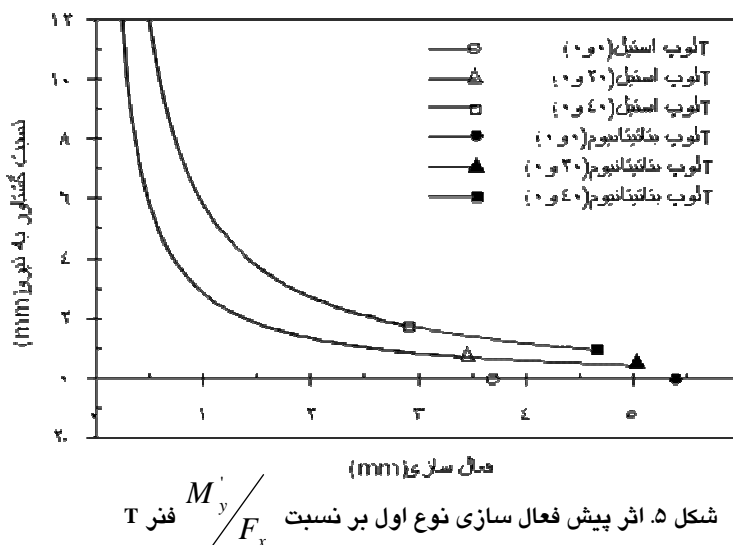
خم نوع دوم این نسبت افزایش قابل توجهی می‌یابد، هرچند به دنبال فعال سازی بیشتر فنر، به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.

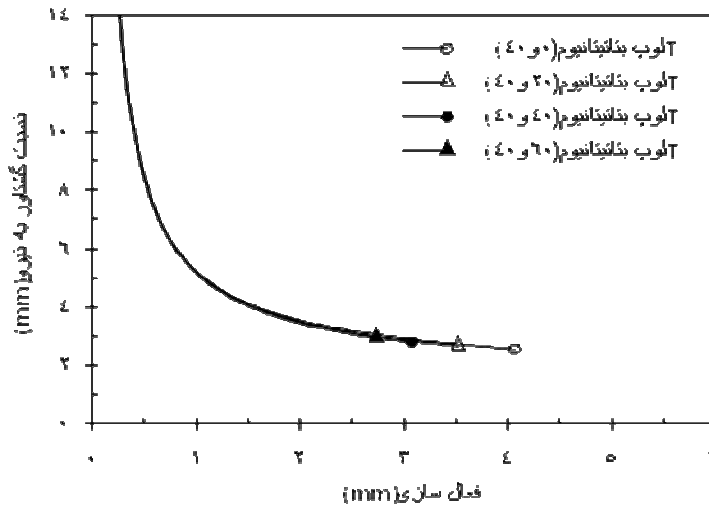
حرکت انتقالی دندان در سه پلن فضایی، علاوه بر پیش فعال سازی نوع دوم نیازمند اعمال گشتاور ضد چرخش در پلن اکلوزال ($x-z$) نیز می‌باشد که با اعمال خم نوع اول در فنر تولید می‌گردد. در مقایسه با پلن ساژیتال ($x-y$)، فعال سازی فنر باعث تولید گشتاور ذاتی در پلن اکلوزال ($x-z$) نمی‌گردد و بنابر این برای حصول نسبت M'_y/F_x ۳/۵ میلی‌متری، اعمال پیش فعال سازی نوع اول در فنر رترکشن ضروری است. این نسبت با اعمال پیش فعال سازی نوع اول افزایش می‌یابد و متعاقب فعال سازی بیشتر فنر، به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد (شکل ۵).

در بررسی اثرات متقابل خم‌های نوع اول و دوم، شکل ۶ بیانگر عدم تأثیر خم نوع اول بر نسبت M'_z/F_x می‌باشد. این یافته توسط پژوهش تجربی Katona و همکاران [۲] بر روی فنرهای سه ضلعی استیل با پیش فعال سازی‌های نوع اول و دوم نیز تأیید می‌گردد. بر اساس یافته‌های پژوهش مذکور، خم‌های پیش فعال سازی نوع اول و دوم اثرات مطلوب و مستقل از یکدیگر دارند. شکل ۷ نشانگر اثر خم نوع دوم بر نسبت M'_y/F_x است. بر این اساس، هر چند که با افزایش خم نوع دوم نسبت M'_y/F_x کاهش می‌یابد، این کاهش بیشتر در

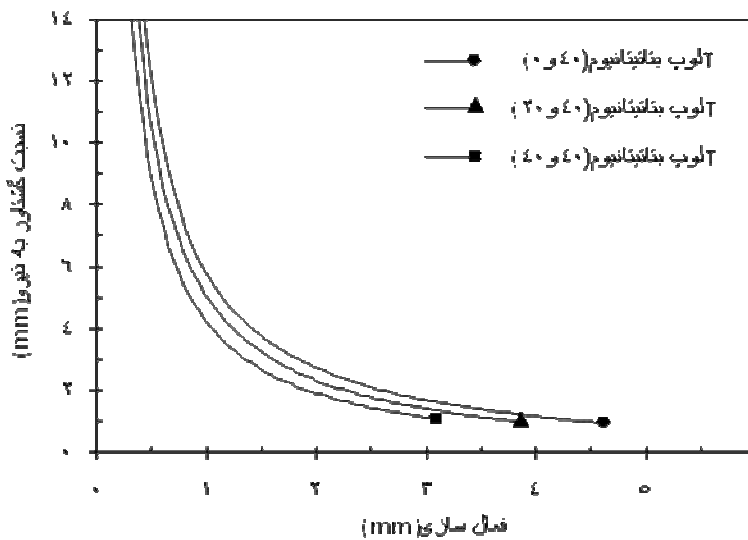
جنس بتا تیتانیوم را با نتایج حاصل از پژوهش تجربی مقایسه نموده و مقدار توافق دو روش را در حدود ۱۰ درصد گزارش کرده‌اند.

در بررسی اثر پیش فعال سازی نوع دوم بر خصوصیات سیستم نیروی فنرهای رترکشن، همان طور که در شکل ۵ مشاهده می‌گردد، اعمال این نوع پیش فعال سازی با افزایش نسبت M'_z/F_x همراه است. فنرهای رترکشن در اثر تغییر شکل ناشی از فعال سازی فنر گشتاوری تولید می‌نمایند که بدان گشتاور ذاتی (Inherent moment) گفته می‌شود. این گشتاور در اغلب فنرهای رترکشن قابلیت ممانعت از Tip شدن تاج دندان را ندارد. از این رو با اعمال پیش فعال سازی نوع دوم، گشتاور باقی‌مانده (Residual moment) در پلن $x-y$ تولید می‌شود تا مجموع این دو گشتاور (M'_z) مانع از Tip دیستالی تاج دندان گردد. بر خلاف اثر مطلوب پیش فعال سازی نوع دوم بر بهبود نسبت گشتاور به نیرو (M'_z/F_x)، افزایش LDR فنر و نیز کاهش حداکثر فعال سازی فنر از عوارض نامطلوب این پیش فعال سازی محسوب می‌گردد (جدول ۱ و ۲). نتایج پژوهش Raboud و همکاران [۱] در خصوص اثر خم نوع دوم بر LDR و حداکثر فعال سازی فنر نیز مؤید نتایج پژوهش حاضر است. همان طور که در شکل ۵ مشاهده می‌گردد، در صورت عدم اعمال پیش فعال سازی نوع دوم، نسبت گشتاور به نیرو تا حدودی مستقل از مقدار فعال سازی فنر می‌باشد ولی با اعمال





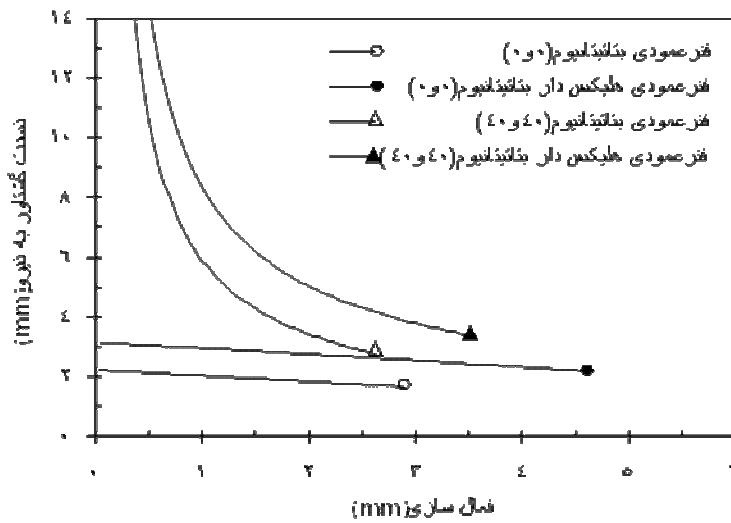
شکل ۶. اثر پیش فعال سازی نوع اول بر نسبت M'_z/F_x فنر T



شکل ۷. اثر پیش فعال سازی نوع دوم بر نسبت M'_y/F_x فنر T

نیز افزودن هلیکس به طرح لوب عمودی با افزایش نسبت M'_z/F_x همراه بوده است که مؤید نتایج پژوهش حاضر است. این در حالی است که Thiesen و همکاران [۵] در بررسی اثر ژئومتری فنر T بر سیستم نیروی فنر گزارش نمودند که افزودن هلیکس به طرح فنر T باعث کاهش نسبت گساور به نیرو (M'_z/F_x) می‌گردد. Faulkner و همکاران [۷] نیز پیشتر در

مقادیر کم فعال سازی مشهود است. این در حالی است که Menghi و همکاران [۱۳] و Raboud و همکاران [۳، ۱] اثرات خم‌های نوع اول و دوم را مستقل از یکدیگر گزارش کرده‌اند. در بررسی اثرات هلیکس بر سیستم نیروی فنرهای رترکشن عمودی، شکل ۸ بیانگر افزایش نسبت M'_z/F_x در فنر عمودی هلیکس دار است. در پژوهش تحلیلی Raboud و همکاران [۱]

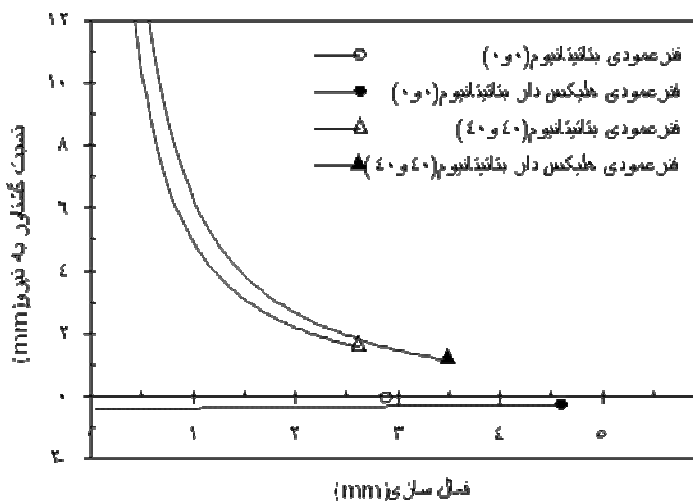


شکل ۸. اثر هلیکس بر نسبت M'_z/F_x فنر رترکشن عمودی

فنرهای استیل است که با مقادیر ضریب کشسانی دو ماده و مونوگراف‌های [Kusy ۱۴] همخوانی دارد. نتیجه پژوهش Menghi و همکاران [۱۳] نیز مؤید مطلب فوق است. نمودارهای نسبت گشتاور به نیرو برحسب تغییر شکل فنرهای استیل و بتا تیتانیوم در هردو پلن اکلوژال ($x-z$) و ساژیتال ($x-y$) با اندکی تقریب بر یکدیگر منطبق می‌باشند (شکل‌های ۴ و ۵). علت این تشابه در تناسب گشتاور و نیروی فنر (صورت و مخرج کسر M/F) با ضریب کشسانی ماده است که بدین ترتیب نسبت گشتاور به نیرو مستقل از ضریب کشسانی ماده خواهد بود.

یک مطالعه تجربی - تحلیلی نشان دادند که افزودن هلیکس به طرح فنر T تأثیر چندانی بر نسبت M'_z/F_x ندارد و بنابر این افزودن هلیکس را از نظر علمی غیر ضروری دانستند. علاوه بر این، شکل ۹ نشان می‌دهد که افزودن هلیکس به طرح عمودی علاوه بر افزایش نسبت M'_z/F_x باعث افزایش جزیی نسبت M'_y/F_x نیز می‌گردد.

در مقایسه فنرهای رترکشن ساخته شده از سیم‌های بتا تیتانیوم و استیل، LDR فنرهای بتا تیتانیومی در حدود نصف



شکل ۹. اثر هلیکس بر نسبت M'_y/F_x فنر رترکشن عمودی

نتیجه گیری

خم‌های نوع اول و دوم در پیش فعال سازی فنرهای رترکشن اثرات مطلوب و به نسبت مستقل از یکدیگر دارند. کاربرد هلیکس در فنرهای رترکشن ممکن است باعث بهبود نسبی خصوصیات مکانیکی سیستم نیروی فنر گردد. کاربرد سیم بتا تیتانیوم ممکن است با کاهش نسبت گشتاور به نیرو در فعال سازی فنر برای اعمال نیروی بهینه همراه باشد؛ از این رو، در این فنرها توجه به کفایت بالینی پیش فعال سازی‌های نوع اول و دوم از نظر بالینی حایز اهمیت است.

قدردانی

در پایان لازم است از زحمات مهندس عباس جبار زارع و به ویژه مهندس حسن طالبی که با دقت و حوصله فراوان نمونه سازی و تحلیل المان محدود این طرح را به انجام رساندند، تقدیر به عمل آید.

با توجه به LDR کمتر فنرهای بتاتیتانیومی، این فنرها برای اعمال نیروی بهینه باید بیش از فنرهای استیل فعال گردند که این مسأله باعث کاهش نسبت گشتاور به نیرو در هر دو پلن مذکور می‌گردد (شکل‌های ۴ و ۵). بنابراین در کاربرد سیم‌های با ضریب کشسانی کم همچون آلیاژهای تیتانیوم در ساخت فنرهای رترکشن باید به این نکته دقت داشت که نیاز به فعال سازی بیشتر فنر به دلیل LDR کم، نسبت گشتاور به نیرو در دو پلن اکلوزال و ساژیتال را کاهش می‌دهد؛ از این رو ارتودونتیست باید از کفایت بالینی خم‌های پیش فعال سازی اطمینان حاصل نماید.

تعمیم نتایج پژوهش‌های تحلیلی به شرایط بالینی مستلزم انجام پژوهش‌های تجربی است. بنابراین عدم آزمون فرضیات به روش تجربی از محدودیت‌های پژوهش حاضر محسوب می‌گردد. همان طور که پیشتر گفته شد، در پژوهش حاضر سعی گردید با مدل سازی و تحلیل فنر مورد آزمون تجربی در پژوهش‌های قبلی، اعتبار نتایج پژوهش مورد سنجش قرار گیرد.

References

1. Raboud DW, Faulkner MG, Lipsett AW, Haberstock DL. Three-dimensional effects in retraction appliance design. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1997; 112(4): 378-92.
2. Katona TR, Le YP, Chen J. The effects of first- and second-order gable bends on forces and moments generated by triangular loops. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2006; 129(1): 54-9.
3. Raboud D, Faulkner G, Lipsett B, Haberstock D. Three-dimensional force systems from vertically activated orthodontic loops. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2001; 119(1): 21-9.
4. Chen J, Markham DL, Katona TR. Effects of T-loop geometry on its forces and moments. *Angle Orthod* 2000; 70(1): 48-51.
5. Thiesen G, do Rego MV, de Menezes LM, Shimizu RH. Force systems yielded by different designs of T-loop. *Aust Orthod J* 2005; 21(2): 103-10.
6. Raboud D, Faulkner MG, Lipsett AW. Segmental approach for large three-dimensional rod deformations. *International journal of solids and structures* 1996; 33(8): 1137-56.
7. Faulkner MG, Fuchshuber P, Haberstock D, Mioduchowski A. A parametric study of the force/moment systems produced by T-loop retraction springs. *J Biomech* 1989; 22(6-7): 637-47.
8. Krishnan V, Kumar KJ. Mechanical properties and surface characteristics of three archwire alloys. *Angle Orthod* 2004; 74(6): 825-31.
9. Koenig HA, Vanderby R, Solonche DJ, Burstone CJ. Force systems from orthodontic appliances: an analytical and experimental comparison. *J Biomech Eng* 1980; 102(4): 294-300.
10. Mazza D, Mazza M. Specialized spring design in segmented edgewise orthodontics: further verification of dedicated software. *Angle Orthod* 2000; 70(1): 52-62.
11. Mazza D, Mazza M. Specialized spring design in segmented edgewise orthodontics. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1997; 112(6): 684-93.
12. Lipsett AW, Faulkner MG, el Rayes K. Large deformation analysis of orthodontic appliances. *J Biomech Eng* 1990; 112(1): 29-37.

13. Menghi C, Planert J, Melsen B. 3-D experimental identification of force systems from orthodontic loops activated for first order corrections. *Angle Orthod* 1999; 69(1): 49-57.
14. Kusy RP. On the use of nomograms to determine the elastic property ratios of orthodontic arch wires. *Am J Orthod* 1983; 83(5): 374-81.