

## **Evaluation of Bone Butterfly Fracture by Controlling the Applied Load at Different Strain Rates**

**M.R. Azghani<sup>1\*</sup>, Sh. Kian-Bostanabad<sup>2</sup>, T. Ahmadi-Kholardi<sup>3</sup>, H. Khabiri<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> Ph.D, Associate Professor in Biomechanics, Department of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

<sup>2</sup> M.Sc, Department of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

<sup>3</sup> M.Sc, Department of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

<sup>4</sup> M.Sc, Department of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

Receipt in the online submission system: 3 October 2017, received in revised form: 24 October 2017, accepted: 29 October 2017

---

### **Abstract**

**Long bone fracture is the most prevalent traumatic fractures that accures due to the strike and attacted load exertions, which one of them is the butterfly fracture. This type of fracture may happen with sudden and combined forces. Since in this type of fracture, the number of fracture lines is more than other types of fractures, developing a prohibitive method may be usfull. The present paper is aimed to investigate the effects of strain rate and use of fastener on butterfly fracture in bone samples. To this end, invivo sheep metacarpal bone samples were examined in four groups: distinguished based on different strain rates, loading conditions and boundry conditions. The first one underwent pure bending at rate of 20 mm/s. The second group and third group experience combined bending and axial compression at rate of 5 mm/s and 20 mm/s, respectively. Bone samples in the fourth group, however, sustained combined loading of bending and axial compression while their ends had been fixed. Comparison between the first and third groups significantly stated that exerting axial compression increases the number of butterfly fractured samples. Results show that at the higher strain rates, the number of butterfly fracture increases. Constraining the ends of the bone samples, on the other hand, led to dissipate the effects of combined loading and also high strain rate. Furthermore, a considerable accordance was observed based on Pearson Correlation test by amount of 0.947.**

**Key words:** *Butterfly Fracture, Strain Rate, Metacarpal Bone*

---

**\*Corresponding author**

**Address:** Department of Biomechanics, Faculty of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, P.O. Box: 51335-1996, Tabriz, Iran

**Tel:** +98-41-3345 9491

**Fax:** +98-41-3344 4309

**E-mail:** [azghani@sut.ac.ir](mailto:azghani@sut.ac.ir)

## بررسی شکست پروانه‌های استخوان با کنترل میزان بار اعمالی در نرخ‌های کرنشی متفاوت

محمودرضا آذغانی<sup>۱\*</sup>، شراره کیان بستان آباد<sup>۲</sup>، تارا احمدی خلردی<sup>۳</sup>، حمید خبیری<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشیار گروه مهندسی پزشکی - بیومکانیک، دکترای تخصصی بیومکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

<sup>۲</sup> کارشناس ارشد مهندسی پزشکی - بیومکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

<sup>۳</sup> کارشناس ارشد مهندسی پزشکی - بیومکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

<sup>۴</sup> کارشناس ارشد مهندسی پزشکی - بیومکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

تاریخ ثبت در سامانه: ۱۳۹۶/۷/۱۱، بازنگری: ۱۳۹۶/۸/۲، پذیرش قطعی: ۱۳۹۶/۸/۷

### چکیده

شکستگی استخوان بلند، یکی از شکستگی‌های شایع است که در اثر ضربه یا اعمال نیروی خارج از مرکز اتفاق می‌افتد. یکی از انواع این شکستگی‌ها، شکست پروانه‌ای است. این نوع شکست، با اعمال نیروی ناگهانی یا نیروی ترکیبی به‌وجود می‌آید. تعداد خطوط شکستگی در این جراحات، بیشتر از شکستگی‌های دیگر است؛ بنابراین بررسی شرایط وقوع این شکستگی، به شناسایی هرچه بیشتر آن کمک می‌کند. هدف از انجام این مطالعه، بررسی تأثیر نرخ کرنش و استفاده از بست در ایجاد این شکست در نمونه‌های استخوانی است. نمونه‌های استخوان متاکارپال گوسفند، در چهار گروه آزمایشی متفاوت از لحاظ نرخ کرنش، شرایط بارگذاری و شرایط مرزی، استفاده شده‌اند. گروه اول تحت خمش ساده با نرخ  $20 \text{ mm/s}$  و گروه‌های دوم و سوم، به ترتیب با نرخ کرنش  $5 \text{ mm/s}$  و  $20 \text{ mm/s}$  تحت نیروی ترکیبی خمشی و فشاری محوری قرار گرفته‌اند. در گروه چهارم، نمونه‌های استخوانی همراه با بست تحت نیروی ترکیبی قرار گرفته‌اند. مقایسه یافته‌های آزمون تحلیل یک‌طرفه گروه اول و سوم با اختلاف معناداری نشان می‌دهد که اعمال نیروی محوری، تعداد شکست پروانه‌ای را افزایش می‌دهد. مقایسه گروه دوم و سوم نشان داده است که در نرخ کرنش بیشتر، تعداد شکست پروانه‌ای بیشتری دیده می‌شود. نتیجه‌های آزمون همبستگی نشان می‌دهد که با اعمال بست، اثر نیروی ترکیبی و همچنین نرخ بالا در تشکیل این نوع شکست، از بین رفته است؛ به‌علاوه، آزمون همبستگی پیرسون برای نتیجه‌های گروه‌های اول و چهارم، نشان‌دهنده شباهت  $0/947$  این دو گروه است.

کلیدواژه‌ها: شکست پروانه‌ای، نرخ کرنش، استخوان متاکارپال

\*نویسنده مسئول

نشانی: گروه بیومکانیک، شهر جدید سهند، دانشگاه صنعتی سهند، دانشکده مهندسی مکانیک، کد پستی: ۱۹۹۶-۵۱۳۳۵

تلفن: ۳۳۴۵۹۴۹۱ (۴۱) ۹۸+

دورنگار: ۳۳۴۴۴۳۰۹ (۴۱) ۹۸+

پست الکترونیکی: azghani@sut.ac.ir

**۱- مقدمه**

شکستگی استخوان بلند، یکی از شکستگی‌های شایع است، که در اثر ضربه یا اعمال نیروی خارج از مرکز اتفاق می‌افتد. در واقع شکستگی، حالتی است که جداسازی کامل یا ناقص، یا به هم خوردن ارتباط استخوان با غضروف رخ می‌دهد. نظریه‌های مختلفی دربارهٔ ایجاد شکست وجود دارد، که برخی آن را به نیروی برشی و برخی آن را به نیروی کششی نسبت می‌دهند [۱]. استخوان هنگامی دچار شکستگی می‌شود که نیرویی با نرخ کرنش بالا در جهتی غیرمعمول، بر آن وارد شود [۲]. ضربه در راستای عرضی و میانی استخوان بلند، به آسیب‌های جدی، مانند شکستگی و ترک، منجر می‌شود [۳]. یافته‌ها نشان می‌دهند که این آسیب‌ها برای افرادی که با وسایل نقلیه تصادف می‌کنند، بیشتر به وجود می‌آید [۴].

نوع بارگذاری، اثر مستقیم بر الگوی شکست خواهد داشت؛ به طوری که نوع اعمال نیرو، مانند فشار، کشش، برش و خمش، جهت‌گیری خط‌های شکست را مشخص می‌کند [۵] و میزان اتلاف انرژی، بر درجهٔ به هم پیوستگی خط‌ها اثر می‌گذارد [۶]. از جمله انواع شکستگی‌ها با توجه به الگوی شکست، می‌توان به شکستگی‌های عرضی، مورب، مارپیچ، له‌شدگی، چندگانه و پروانه‌ای اشاره کرد. شکست پروانه‌ای، یکی از انواع شکستگی‌های تنهٔ استخوان‌های بلند است که نیروی خمشی یا ترکیب نیروی خمشی با نیروی محوری، عامل به وجود آورندهٔ آن است. در واقع، خمش به ایجاد شکست پروانه‌ای در راستای بیشترین نیروی برشی و بیشترین نیروی کششی منجر می‌شود [۷].

این نوع شکست از نظر شکل ظاهری به سه دسته تقسیم می‌شود، که عبارت‌اند از: شکست پروانه‌ای ساده، شکست پروانه‌ای نصفه و شکست پروانه‌ای دو تکه، که به طور معمول خطوط شکست بیشتری نسبت به سایر شکست‌ها داشته و زمان ترمیم آن طولانی است؛ در نتیجه، جلوگیری از ایجاد این شکست، سودمند خواهد بود.

بر اساس یافته‌های بیمارستانی مشاهده شده است که ضربه به استخوان‌های زنده‌ترین و درشت‌نی، به طور معمول موجب شکست پروانه‌ای می‌شود. که این اتفاق برای انسان در تصادف‌ها، بسیار معمول است [۸]. خمش به طور هم‌زمان، چند محور از استخوان را درگیر کرده و به اعمال تنش در چند جهت متفاوت به آن منجر می‌شود [۹].

اعمال نیروی ضربه به قسمت جانبی یک استخوان بلند، باعث ایجاد خمش در طول استخوان می‌شود. شکستگی از قسمتی

که تحت کشش است (دور از ضربه)، شروع شده و در طول استخوان، تا قسمت میانی پیشرفت می‌کند. زمانی که خط شکست به قسمت تحت فشار می‌رسد، در امتداد مسیر بیشینه نیروی برشی (در ۴۵ درجهٔ عرضی) پیش می‌رود و به این ترتیب، یک قطعهٔ پروانه‌ای ایجاد می‌شود [۱۰].

خاصیت‌های مکانیکی استخوان، می‌تواند بر نوع شکست اثرگذار باشد. رایلتی با استفاده از آزمایش خمش بر استخوان ران گوزن، نشان داد که با افزایش زمان پس از مرگ، به دلیل کاهش درصد کلژن در بافت استخوانی، درصد شکست پروانه‌ای افزایش می‌یابد [۱۱].

نرخ بارگذاری، اهمیت ویژه‌ای در اجرای تست خمش دارد. در آزمایش‌هایی که بارگذاری به صورت ضربه‌ای و ناگهانی بوده است، احتمال شکست پروانه‌ای به نسبت بیشتر از مواردی است که نرخ بارگذاری در آن‌ها کمتر می‌باشد [۱۲].

فارسیت و همکارانش، با اعمال ضربه به استخوان‌های درشت‌نی و زنده‌ترین اسب که تحت نیروی محوری قرار داشتند، نشان دادند که تعداد شکست کامل در درشت‌نی بیشتر از زنده‌ترین بوده و در مقایسهٔ فراوانی انواع شکست در شکست‌های کامل، شکست پروانه‌ای بیشترین درصد را داشته است. بر اساس یافته‌های این آزمایش، انرژی پایین به شکست ناکامل و ساده و انرژی بالا به شکست پروانه‌ای منجر می‌شود [۱۲]. همچنین در مطالعهٔ انجام شده روی اسب‌ها، مشاهده شده است که بیشتر شکست‌های درشت‌نی و زنده‌ترین، در اثر ضربه به قسمت داخلی ایجاد می‌شوند [۱۳].

هدف مطالعه، بررسی شکست پروانه‌ای در استخوان متاکارپال گوسفند تحت نیروهای خمشی با نرخ کرنش (تغییر طول در واحد زمان) متفاوت و همراه با نیروی محوری و شناخت هرچه بیشتر این نوع شکست برای کاهش احتمال وقوع آن و نیز بررسی اثر استفاده از بست در ایجاد این نوع شکست است.

**۲- مواد و روش‌ها****۲-۱- تهیهٔ نمونه‌ها**

برای کاهش خطای احتمالی ناشی از تفاوت نمونه‌های استخوانی، استخوان‌های متاکارپال از گوسفند‌های نر با یک نژاد و حدود وزن یکسان انتخاب شده‌اند (نژاد مهربان-حدود وزنی ۷۰ کیلوگرم).

نمونه‌ها، صبح روز اجرای آزمایش از کشتارگاه تهیه شده و در کمتر از هشت ساعت آزمایش شده‌اند. بعد از تهیهٔ نمونه‌ها از کشتارگاه، استخوان‌ها از لاشه‌ها جدا شدند. بعد از جداسدن

### ۲-۳- گروه‌های مورد آزمایش

ابتدا، ۱۵ نمونه به‌طور آزمایشی، پیش‌آزمون شده‌اند. در این مجموعه از آزمایش‌ها، نیروی شکست خمشی و با استفاده از آن، انرژی این شکست محاسبه شده است. میزان نیروی محوری اعمالی، با استفاده از آچار ترک‌متر تنظیم می‌شود. گیره نجاری با استفاده از آچار ترک‌متر، سفت شده و میزان گشتاور وارد شده به پیچ، در تمام نمونه‌ها ثابت بود. در ادامه، آزمایش‌ها در چهار گروه مشخص اجرا شده‌اند. برای هر گروه، تعداد ۲۰ الی ۳۰ استخوان در نظر گرفته شده است. این چهار گروه، به ترتیب عبارت‌اند از:

گروه اول (کنترل): نمونه‌هایی که تحت خمش سه‌نقطه ساده بوده‌اند. هدف از آزمایش این گروه، به‌دست آوردن مدول الاستیسیته و همچنین، داشتن گروه مینا برای مقایسه با گروه‌های بعدی بوده است. نرخ کرنش در این گروه از نمونه‌ها، ۲۰ میلی‌متر بر ثانیه بوده است. در این گروه، برای ۱۱ مورد از میان ۲۰ عدد نمونه، داده خروجی ثبت شده است.

گروه دوم: نمونه‌هایی که علاوه بر خمش سه‌نقطه، تحت نیروی محوری فشاری قرار گرفته‌اند. نرخ کرنش در این گروه از نمونه‌ها، ۵ میلی‌متر بر ثانیه بوده است. تعداد نمونه‌ها در این گروه، ۲۰ عدد است.

گروه سوم: در این گروه از نمونه‌ها، استخوان‌ها مانند گروه دوم، تحت نیروی ترکیبی خمش سه‌نقطه و نیروی محوری فشاری قرار گرفته‌اند، با این تفاوت که نرخ کرنش در این گروه، ۲۰ میلی‌متر بر ثانیه بوده است. در این گروه، برای ۲۰ مورد از ۲۶ عدد نمونه، داده خروجی ثبت شده است.

گروه چهارم: هدف از آزمایش این این گروه، پیشنهاد روشی برای جلوگیری از ایجاد شکست پروانه‌ای بوده است. این گروه از نمونه‌ها، علاوه بر این که تحت نیروی ترکیبی خمش سه‌نقطه و نیروی محوری فشاری قرار گرفته‌اند، از بست در دو سر استخوان استفاده شده است (مانند شکل ۳). تعداد نمونه‌های این گروه، ۲۱ عدد بوده که برای ۱۶ عدد از آن‌ها، خروجی ثبت شد.



شکل (۳) - نمونه گروه چهارم به همراه بست

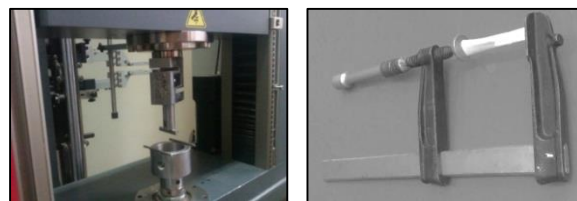
پوست و بافت نرم از استخوان، نمونه‌های استخوانی تهیه شده برای حفظ رطوبت، به آب نمک نرمال آغشته شده و در پارچه آغشته به آب نمک نرمال قرارداده شده‌اند. در طول آزمایش، رطوبت نمونه‌ها و پارچه، به‌طور مرتب تجدید شده است. دو طرف استخوان با استفاده از دستگاه کاتر، به‌صورت عمود بر سطح مقطع، برش داده شده‌اند. شکل ۱، نمونه‌های در حال آماده‌سازی برای اجرای آزمون را نشان می‌دهد.



شکل (۱) - نمونه‌های در حال آماده‌سازی

### ۲-۲- دستگاه

برای اعمال نیروی فشاری در راستای طول نمونه‌ها، از گیره نجاری، مانند شکل ۲-الف، به همراه گشتاورسنج استفاده شده است.



الف ب



ج

شکل (۲) - الف- گیره اعمال نیروی محوری، ب- دستگاه اعمال خمش و ج- نمونه مورد آزمایش

برای اعمال نیروی خمشی به‌صورت خمش سه‌نقطه، از دستگاه Zwick Roell استفاده شده است (شکل ۲-ب). نرخ‌های کرنشی متفاوت، به‌وسیله اپراتور اعمال شد. فاصله دو تکیه‌گاه پایینی، ۶ سانتی‌متر و قطر بین اعمال نیرو، ۴ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. این اندازه‌ها، برای تمام نمونه‌ها در طول آزمایش‌ها ثابت بوده است.

نمونه‌ها از گوسفندهایی با یک نژاد و حدود وزن یکسان و همچنین جنس نر انتخاب شده‌اند. تعداد ۸۷ نمونه در چهار گروه نهایی بررسی شده‌اند.

با توجه به این که استخوان در حالت عادی تحت فشار نیروی وزن است، برای شبیه‌سازی شرایط استخوان در بیرون از بدن با شرایط داخل بدن در طول آزمایش، نمونه‌ها تحت نیروی ثابت فشاری قرار گرفته‌اند (شکل ۲-الف).

### ۲-۳- نحوه توزیع انواع شکست‌های استخوانی

ابتدا، نمونه‌ای از انواع شکستگی‌ها در شکل ۴ ارائه شده است.



شکستگی پروانه‌ای یک تکه  
شکل (۴) - نمونه‌ای از انواع شکستگی

طبق یافته‌های این مطالعه، وارد شدن ضربه به استخوان (بدون در نظر گرفتن گروه‌ها)، باعث ایجاد شکست پروانه‌ای در ۴۷ مورد، شکست عرضی در ۱۷ مورد و شکست مورب در ۲۳ مورد شده است. در جدول ۱، فراوانی انواع شکستگی در هر یک از گروه‌ها نشان داده شده است. درصد ایجاد شکست پروانه‌ای در اثر وارد شدن ضربه، بیشتر از سایر انواع شکست است. این نتیجه، با یافته‌های فارست و همکارانش در این رابطه هم‌خوانی دارد. وی برای استخوان‌های درشت‌نی و زنده‌ترین اسب نشان داد که در هنگام ضربه، شکست پروانه‌ای با درصد فراوانی بیشتری نسبت به سایر انواع شکستگی به وجود می‌آید [۱۲]؛ اما این که افزایش انرژی چه تأثیری بر این درصد دارد، بیان نشده است.

### ۲-۴- تحلیل

پس از انجام آزمایش‌ها و بررسی نرمال بودن داده‌ها، نمودار نیرو برحسب جابجایی، نوع شکستگی و اندازه‌های هر نمونه، ثبت شده و یافته‌های گروه‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS تحلیل شده‌اند. برای مقایسه میانگین نمونه‌ها و همچنین بررسی ارتباط معنادار بین آن‌ها، از آزمون تحلیل واریانس یک طرفه و آزمون توکی استفاده شده است. مقدار  $p$  کمتر از ۰/۰۵، معنی‌دار در نظر گرفته شد. مقدار انرژی شکست و سفتی به ترتیب از رابطه (۱) و (۲) محاسبه شدند.

$$U = \int_0^x P dx \quad (1)$$

$$S = \frac{dU}{dx} \quad (2)$$

که در روابط بالا،  $U$  مقدار انرژی شکست،  $P$  رابطه نیرو برحسب جابجایی و  $S$  میزان سفتی است.

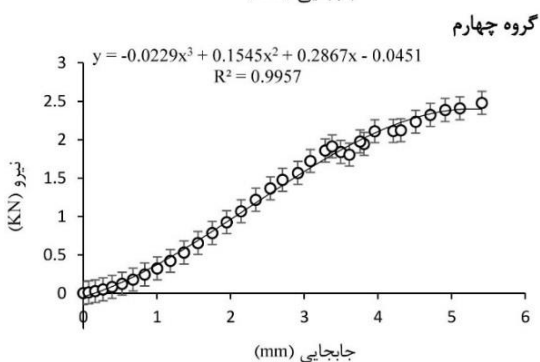
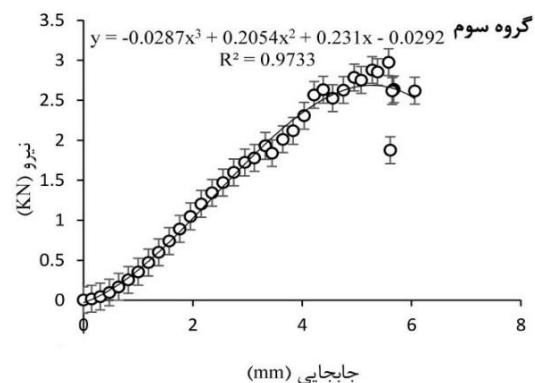
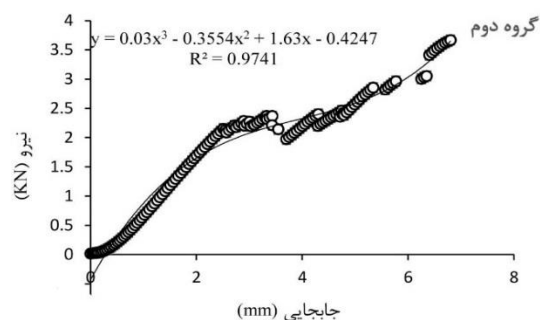
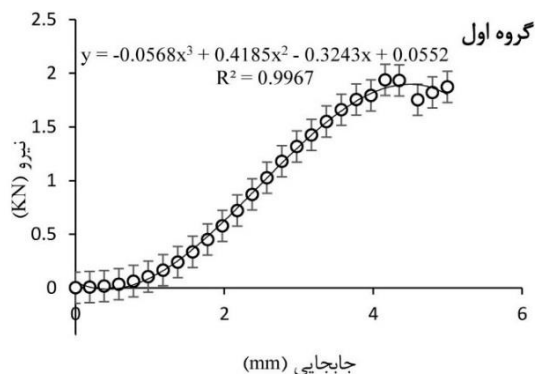
### ۳- یافته‌ها و بحث

استخوان‌های بدن انسان در حالت عادی، تحت نیروهای مختلفی چون فشار، کشش، پیچش و غیره هستند، که اعمال نیرو در جهت نامناسب، به ایجاد آسیب و شکستگی‌های مختلف در آن‌ها منجر خواهد شد. همان‌گونه که ذکر شد، نیروی ترکیبی فشاری و خمشی باعث ایجاد شکست پروانه‌ای می‌شود. هدف از این مطالعه، تحلیل شکست پروانه‌ای است.

### ۳-۱- انتخاب نمونه و شرایط آزمون

برای بررسی خاصیت‌های مکانیکی استخوان، نیاز به انتخاب نمونه آزمایش از استخوان حیوان است. در مطالعات مختلف، از حیوان‌های متفاوتی مانند سگ، خرگوش، اسب، موش و گوسفند استفاده شده است. نیومن و ترنر در مطالعه‌های خود، دلایل مختلفی را برای استفاده از گوسفند، به‌عنوان مدل مناسب، ارائه کردند. گوسفند به دلیل اهلی بودن، نگهداری و پرورش آسان و از همه مهم‌تر، تشابه هورمونی آن با انسان، برای مطالعه و آزمایش استفاده می‌شود [۱۴]. از طرفی، باتوجه به شباهت استخوان متاکارپال گوسفند با استخوان زنده‌ترین انسان، در این مطالعه از استخوان متاکارپال گوسفند استفاده شده است.

با توجه به تغییرات رخ داده برای خاصیت‌های استخوان در طول نگهداری، در آزمون‌ها تلاش شده‌است تا از استخوان تازه با کمترین فاصله زمانی بین کشتار و اجرای آزمایش استفاده شود. همچنین برای کاهش خطای احتمالی ناشی از تفاوت استخوان،



شکل (۵) - نمودارهای نیرو-جابجایی برای چهار گروه مورد آزمایش

آزمون تعقیبی توکی، یافته‌های مشابهی را برای نیروی شکست نشان داد؛ به طوری که اختلاف معناداری بین گروه یک با گروه‌های دو و سه (برای هر دو مورد  $p = 0/000$ ) و نیز بین گروه چهار با گروه‌های دو و سه (مقدار  $p$  به ترتیب برابر  $0/004$  و  $0/000$ ) مشاهده شد. اما تفاوت معنادار بین دو گروه یک و چهار مشاهده نشد ( $p = 0/356$ ).

جدول (۱) - فراوانی انواع شکستگی در چهار گروه مورد مطالعه

گروه	مورب	عرضی	نصفه پروانه‌ای	پروانه‌ای یک تکه	پروانه‌ای دو تکه
۱	۸	۷	۳	۲	۰
۲	۶	۲	۶	۵	۱
۳	۲	۰	۳	۱۲	۹
۴	۷	۸	۲	۳	۱

نتیجه آزمون همبستگی برای فراوانی انواع شکست، نشان دهنده شباهت فراوانی بین گروه‌های یک و چهار بود.

### ۳-۳- نمودارهای جابجایی-نیرو

یافته‌ها نشان می‌دهند که به طور تقریب، میزان جابجایی به طور خطی با افزایش نیرو افزایش می‌یابد. شکل ۵، نمودار میانگین و انحراف استاندارد جابجایی بر حسب نیرو را در هر چهار گروه نشان می‌دهد. طبق این نمودارها، در هر چهار گروه، جابجایی، همبستگی زیادی با مقدار نیرو دارد؛ به طوری که رابطه بین این دو عامل با دقت زیادی با استفاده از چندجمله‌ای درجه ۳، قابل تخمین است.

### ۴-۳- مقایسه عامل‌های بررسی شده بین گروه‌ها

نمودار هیستوگرام مربوط به ممان اینرسی سطح، نیروی شکست و انرژی شکست در هر چهار گروه، نشان دهنده توزیع نرمال داده‌ها در هر چهار گروه است. جدول ۲، مقدار نیرو، انرژی و جابجایی شکست و نیز سفتی نمونه را در هر چهار گروه نشان می‌دهد.

جدول (۲) - مقدار میانگین  $\pm$  انحراف معیار برای عامل‌های

محاسبه شده در هر گروه

گروه	نیروی شکست (KN)	جابجایی شکست (mm)	انرژی شکست (مساحت زیر نمودار) (KN.mm)	سفتی نمونه (شیب نمودار) (KN/mm)
۱	۱/۸۷ $\pm$ ۰/۰۵	۴/۰۶ $\pm$ ۰/۴۸	۳/۰۴ $\pm$ ۰/۶۸	۰/۷۵ $\pm$ ۰/۰۱
۲	۳/۰۵ $\pm$ ۰/۵۵	۳/۹۸ $\pm$ ۱/۱۳	۵/۸۸ $\pm$ ۱/۷	۱/۰۶ $\pm$ ۰/۳۸
۳	۳/۲۸ $\pm$ ۰/۹۱	۴/۴۷ $\pm$ ۱/۱۵	۵/۹۱ $\pm$ ۲/۶۵	۱/۱۸ $\pm$ ۰/۲
۴	۲/۲۶ $\pm$ ۰/۱۹	۳/۸۶ $\pm$ ۰/۷۵	۳/۸۸ $\pm$ ۱/۲	۰/۹ $\pm$ ۰/۰۳

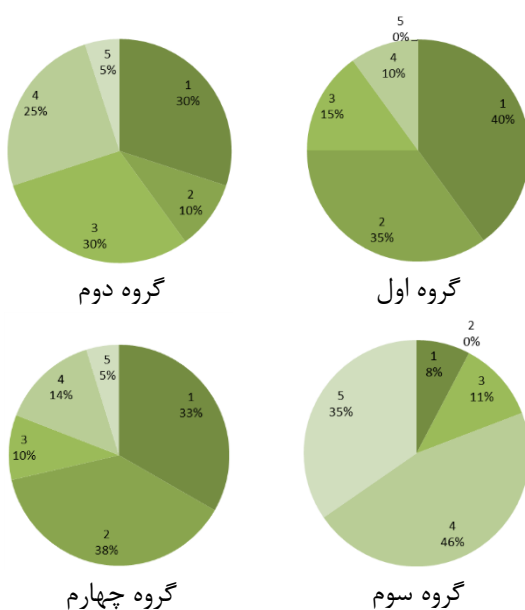
نتیجه‌های حاصل از آزمون تعقیبی توکی برای انرژی شکست، نشان دهنده وجود اختلاف معنادار بین گروه یک با گروه‌های دو و سه (برای هر دو مورد  $p = 0/001$ ) و نیز بین گروه چهار با گروه‌های دو و سه (مقدار  $p$  به ترتیب برابر با  $0/015$  و  $0/013$ ) بود. همچنین تفاوت معناداری بین دو گروه یک و چهار در انرژی شکست، مشاهده نشد ( $p = 0/609$ ).

احتمال شکست پروانه‌ای را در استخوان افزایش می‌دهد. شکل ۶، برای مقایسه بهتر گروه‌ها رسم شده است. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، با اعمال نیروی محوری و همچنین افزایش نرخ بارگذاری، تعداد شکست پروانه‌ای بیشتر می‌شود.

### ۳-۷- تأثیر استفاده از بست

نتیجه‌های آزمون واریانس یک‌طرفه نشان دادند که نرخ کرنش و استفاده از بست، تأثیر معناداری بر نیروی شکست ( $F(3,51) = 15/781$ ) و  $F(3,51) = 7/390$ ، جابجایی شکست ( $p = 0/000$ ) و نیز انرژی شکست ( $F(3,51) = 8/889$ ) و  $p = 0/000$  دارد.

یافته‌های تحلیل واریانس یک‌طرفه برای معیارهای در نظر گرفته شده، اختلاف معناداری را برای گروه‌های آزمایش شده نشان داد. از نتیجه‌های حاصل از آزمون همبستگی



شکل (۶) - درصد انواع شکستگی در هر یک از گروه‌های آزمایشی (انواع شکست: ۱: مورب، ۲: عرضی، ۳: نصفه پروانه‌ای، ۴: پروانه‌ای یک‌تکه و ۵: پروانه‌ای دو تکه)

می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از بست، توانسته اثر نیروی محوری را خنثی کند و باعث کاهش درصد شکست پروانه‌ای شود؛ به گونه‌ای که فراوانی انواع شکست در گروه چهارم، بسیار شبیه به گروه اول، که در آن نمونه‌ها تحت نیروی محوری فشاری نبوده‌اند، است. این موضوع در شکل ۶ مشاهده می‌شود. همان‌گونه که ذکر شد، تفاوت معناداری بین دو گروه یک و چهار در انرژی و نیروی شکست مشاهده نشد.

به‌طور کلی، نتیجه حاصل از آزمون واریانس یک‌طرفه توکی برای انرژی و نیز نیروی شکست، نشان می‌دهد که انرژی و نیروی شکست در گروه‌های اول و چهارم، اختلاف معناداری با گروه‌های دوم و سوم دارد. گروه اول بدون اعمال نیروی محوری، کم‌ترین انرژی و نیروی شکست را داشته و گروه سوم نیز بیشترین انرژی و نیروی شکست را دارد.

### ۳-۵- تأثیر نرخ کرنش

برای بررسی تأثیر نرخ کرنش، با توجه به جدول ۲، میانگین نیرو و انرژی شکست برای گروه سوم، بیشتر از گروه دوم است. همچنین با مقایسه فراوانی انواع شکستگی برای گروه‌های دوم و سوم، مشاهده می‌شود که تعداد شکست پروانه‌ای برای گروه سوم، بیشتر از گروه دوم است (گروه دوم، ۱۲ و گروه سوم، ۲۴ مورد). با توجه به اینکه نرخ کرنش در گروه سوم، بیشتر از گروه دوم است؛ بنابراین افزایش نرخ کرنش در شرایط ثابت، به افزایش وقوع شکست پروانه‌ای منجر شده است. این نتیجه با یافته‌های پیشین، همخوانی دارد [۱۷-۱۵]. فیلدینگ و گرفت نشان دادند که با افزایش نرخ کرنش، حد شکست استخوان درشت‌نی کاهش می‌یابد [۱۵]. از طرفی مطالعه‌های انجام شده برای استخوان کورتیکال نشان می‌دهند که با افزایش نرخ کرنش در یک محدوده خاص، مقاومت این استخوان به شدت کمتر شده [۱۶] و خستگی در آن افزایش می‌یابد [۱۷]. همچنین شیب نمودار، که نشان‌دهنده سفتی نمونه است، در گروه سوم بیشتر از گروه دوم است. این نتیجه ناشی از خاصیت ویسکوالاستیک استخوان است که به موجب آن، نرخ کرنش در اعمال نیروی خمشی اهمیت پیدا می‌کند.

### ۳-۶- بررسی میزان وقوع شکست پروانه‌ای

طبق جدول ۲، با اعمال نیروی محوری، شیب نمودار و نیز مساحت زیر آن افزایش یافته و نمونه‌ها در نیروی اعمالی بیشتری شکسته شده‌اند. همچنین مقایسه یافته‌ها (جدول‌های ۱ و ۲) نشان می‌دهد که با افزایش انرژی، درصد شکست پروانه‌ای افزایش پیدا کرده است؛ به طوری که گروه سوم با بیشترین انرژی شکست، بیشترین تعداد شکست پروانه‌ای و گروه اول با کمترین انرژی شکست، کمترین تعداد شکست پروانه‌ای را دارد. همچنین با توجه به کمتر بودن تعداد شکست پروانه‌ای برای گروه اول (فقط نیروی خمشی) نسبت به گروه‌های دوم و سوم (ترکیب نیروهای خمشی و محوری)، می‌توان نتیجه گرفت که ترکیب نیروهای محوری و خمشی،

- [10] A. Sharir, M.M. Barak, and R. Shahar, "Whole bone mechanics and mechanical testing", *The Veterinary Journal*, vol. 177, no. 1, pp. 8-17, Jul, 2008.
- [11] B. P. Wheatley, "Perimortem or Postmortem Bone Fractures? An Experimental Study of Fracture Patterns in Deer Femora\*", *Journal of forensic sciences*, Vol. 53, no. 1, pp. 69-72, Jan, 2008.
- [12] A. E. Furst, S. Oswald, S. Jaggin, G. Piskoty, S. Michel and J. A. Auer, "Fracture configurations of the equine radius and tibia after a simulated kick", *Veterinary and Comparative Orthopaedics and Traumatology*, vol. 21, no. 1, pp. 49-58, Jan, 2008.
- [13] S. Derungs, A. Fuerst, C. Haas, U. Geissbühler, J. A. Auer, "Fissure fractures of the radius and tibia in 23 horses: a retrospective study", *Equine Veterinary Education*, vol. 13, no. 6, pp. 313-318, Dec, 2001.
- [14] E. Newman, A. S. Turner and J. D. Wark, "The potential of sheep for the study of osteopenia: current status and comparison with other animal models", *Bone*, vol. 16, no. 4, pp. S277-S284, Apr, 1995.
- [15] R. A. Fielding, R. H. Kraft, A. Przekwas and X. G. Tan, "Development of a lower extremity model for high strain rate impact loading", *International Journal of Experimental and Computational Biomechanics*, vol. 3, no. 2, pp. 161-186, 2015.
- [16] A. Ural, P. Zioupos, D. Buchanan, and D. Vashishth, "The effect of strain rate on fracture toughness of human cortical bone: a finite element study", *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, vol. 4, no. 7, pp. 1021-1032, Oct, 2011.
- [17] M. B. Schaffler, E. L. Radin and D. B. Burr. "Mechanical and morphological effects of strain rate on fatigue of compact bone", *Bone*, vol. 10, no. 3, pp. 207-214, Jan, 1989.

### ۳-۸- محدودیت‌ها

در این مطالعه به دلیل مشکل نرم‌افزاری، برای یک سری از نمونه‌ها، خروجی ثبت نشده است؛ به همین دلیل تنها نوع شکست این نمونه‌ها در تحلیل آماری استفاده شده‌اند. همچنین باتوجه به اصل "سن ونان" از روی گشتاور نشان داده شده در گشتاورسنج، نمی‌توان اطلاعات دقیقی از میزان دقیق نیروی محوری اعمالی به استخوان گزارش کرد؛ از این رو در حالت بار مرکب، مقدار نیروی محوری در محاسبات وارد نشده است.

### ۴- نتیجه‌گیری

در حالت کلی می‌توان گفت که ترکیب نیروی خمشی با فشاری به افزایش شکست پروانه‌ای در استخوان‌های دراز منجر می‌شود. همچنین در شرایط یکسان از نظر نوع بارگذاری، افزایش نرخ کرنش، احتمال این نوع شکست را افزایش می‌دهد. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهند که استفاده از بست در دو طرف استخوان، اثر نیروی محوری را از بین برده و احتمال وقوع شکست پروانه‌ای را کاهش می‌دهد.

### ۶- مراجع

- [1] G. Leitz, "Ursachen des Bruchverhaltens langer Röhrknochen: Untersucht am Beispiel der menschlichen Fibula", *Enke*, vol. 6, 1970.
- [2] J. D. Currey, "Bone architecture and fracture", *Current osteoporosis reports*, vol. 3, no. 2, pp. 52-56, Jun, 2005.
- [3] M. Kramer, K. Burow and A. Heger, "Fracture mechanism of lower legs under impact load", *SAE Technical Paper* pp. 730966-730986, Feb, 1973.
- [4] J. Yang, "Review of injury biomechanics in car-pedestrian collisions", *International journal of vehicle safety*, vol. 1, no. 1-3, pp. 100-117, Jun, 2005.
- [5] A. Autefage, "The point of view of the veterinary surgeon: bone and fracture", *Injury* vol. 31, pp. 50-93, Sep, 2000.
- [6] A. J. Nixon, "Equine fracture repair", *Saunders*, 1996.
- [7] C. H. Turner, "Bone strength: current concepts", *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 1068, no. 1, pp. 429-446, Apr, 2006.
- [8] R. Johner and O. Wruhs. "Classification of tibial shaft fractures and correlation with results after rigid internal fixation", *Clinical orthopaedics and related research*, vol. 178, pp. 7-25, Sep, 1983.
- [9] M. N. Pathria, B. C. Christine B. and D. L. Resnick, "Acute and stress-related injuries of bone and cartilage: pertinent anatomy, basic biomechanics, and imaging perspective", *Radiology*, vol. 280, no. 1, pp. 21-38, Jun, 2016.