

تعیین خواص مکانیکی شکست استخوان کورتیکال با استفاده از نمونه‌های کمان- شکل

علیزاده فرد، فرشته^۱ / میرزائی، مجید^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

مشخصات مقاله

شناسه‌ی دیجیتال: 10.22041/1 JBME. 2020. 122037. 1566

پذیرش: ۹ خرداد ۱۳۹۹

بازنگری: ۱۳۹۹/۳/۹-۱۳۹۹/۳/۵-۱۳۹۹/۲/۲۰

ثبت در سامانه: ۳ اسفند ۱۳۹۸

واژه‌های کلیدی	چکیده
استخوان کورتیکال	با توجه به کاربرد آزمایش و تحلیل شکست استخوان در هر دو حوزه‌ی پزشکی و مهندسی یافتن نمونه‌ی مناسب برای اندازه‌گیری خواص مکانیکی شکست بسیار مهم است. لذا در این مطالعه به تحلیل تجربی و عددی شکست استخوان کورتیکال گوساله برای ۴ ناحیه‌ی آناتومیکی با استفاده از نمونه‌های کمان- شکل پرداخته شده‌است. تست تجربی شکست برای نمونه‌های کمان- شکل دردمای محیط انجام شده و در عمل فاکتور شدت تنش با استفاده از فرمول تحلیلی استاندارد برای نمونه‌های کمان- شکل و روش مدل المان محدود مربوط به نمونه‌ها محاسبه شده‌است. به منظور صحت‌سنجی مدل المان محدود، نتایج تحلیل تنش و کرنش با نتایج به‌دست‌آمده از روش برهم نگاری تصاویر دیجیتالی مقایسه شده است. توافق بسیار خوب بین نتایج تحلیل تنش و کرنش عددی و تجربی، نشان دهنده‌ی دقت تحلیل المان محدود است. در این مطالعه ارتباط خوبی در شروع و رشد ترک بین نتایج تجربی و المان محدود و همچنین مقادیر چقرمگی شکست به دست آمده از روش عددی با دیگر مطالعات مشاهده شده‌است. هم‌چنین نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد که فاکتور شدت تنش تحلیلی می‌تواند نتایج دقیقی برای نمونه‌های کمان- شکل ایجاد شده از نواحی آناتومیکی خلفی و قدامی ارائه کند. هر چند برای نواحی آناتومیکی میانی و جانبی تنها مدل المان محدود می‌تواند دقت لازم را فراهم سازد.

*نویسنده‌ی مسئول:

نشانی: دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
کد پستی: ۱۴۱۱۵-۱۴۳
پست الکترونیک: mmirzaei@modares.ac.ir
تلفن: ۸۲۸۸۳۳۵۷-۲۱-۹۸+
دورنگار: ۸۲۸۸۴۹۰۹-۲۱-۹۸+

شکستگی استخوان یک موضوع پر اهمیت جهانی بوده که منجر به مطالعات گسترده‌ای در مورد رفتار مکانیکی استخوان از جمله بافت کورتیکال شده‌است. شکستگی استخوان علاوه بر هزینه‌های درمانی زیاد معمولاً منجر به بازتوانی‌های طولانی، ناتوانی و حتی مرگ افراد می‌شود. سالانه ۱/۶ میلیون شکستگی استخوان ران و مفصل هیپ در جهان رخ داده که بخش زیادی از این شکستگی‌ها در اثر افتادن بوده و حدود ۹۰٪ از آن‌ها در افراد بالای ۶۵ سال دیده شده‌است. لذا مطالعه شکست استخوان به دلیل افزایش جمعیت افراد سال‌خورده امری اجتناب ناپذیر است [۱].

درک رفتار و مکانیسم شکست استخوان در هر دو حوزه‌ی مهندسی و پزشکی اهمیت زیادی دارد به طوری که در علم پزشکی به منظور پیش‌بینی و پیش‌گیری از خطر شکست استخوان و در حوزه‌ی مهندسی برای طراحی و ساخت پروتزها و ایمپلنت‌های استخوانی از آن استفاده می‌شود. یکی از مسائل کلیدی در ساخت انواع ایمپلنت‌های استخوانی، شناسایی مواد سازگار با خواص مکانیکی متداول برای توصیف شکست استخوان کافی نبوده و به شناخت خواص مکانیکی شکست نیاز است.

تا پیش از سال ۱۹۷۰، خواص مکانیکی استخوان بیش‌تر با استفاده از پارامترهایی نظیر مدول الاستیک^۱ و استحکام^۲ گزارش شده [۲]، اما برای درک بهتر رفتار مکانیکی شکست استخوان، درک مکانیک شکست و استفاده از خواص مکانیکی شکست امر ضروری است [۳، ۴]. پس از گذشت ۳۰ سال، خواص مکانیکی شکست استخوان کورتیکال به خوبی مورد مطالعه و بررسی قراگرفته‌است. در این راستا تاثیر عوامل مختلفی از جمله نوع نمونه‌ی مورد تست (مانند SENB [۷، ۴] و فشار- کشش [۳، ۸-۱۲])، منبع استخوان (مانند استخوان ران^۳ گوساله یا انسان [۸]) و جهت ترک^۴ [۹، ۱۳] مورد بررسی قراگرفته‌است. در مقاله‌ی ملوین و هم‌کارانش [۵] از مفهوم مکانیک

¹ Elastic Modulus

² Strength

³ Femur

⁴ Crack Orientation

شکست برای مطالعه‌ی چقرمگی شکست استخوان کورتیکال و از مدل SENB برای تخمین چقرمگی شکست استخوان ران گوساله استفاده شده‌است. در مطالعه‌ی سانتیس و هم‌کارانش [۱۴] از یک نمونه حاوی بریدگی شورن^۱ برای تخمین چقرمگی شکست استخوان گوساله استفاده شده‌است. در بعضی از مطالعات نیز چقرمگی شکست استخوان بازو^۲ بررسی شده‌است [۹]. در اکثر مطالعات از سایر نمونه‌های تست تجربی شامل SENB و فشار- کشش [۵، ۸، ۹] استفاده شده و پژوهش‌های اندکی برای آنالیز شکست استخوان با استفاده از نمونه‌های کمان- شکل انجام شده‌است. در پژوهش هانکلر و هم‌کارانش [۱۵] از نمونه‌های کمان- شکل برای اندازه‌گیری خواص مکانیکی شکست استخوان زندزیرین^۳ خرگوش و در مقاله‌ی میرزائی و هم‌کارانش [۱۶] از این نمونه‌ها برای ارزیابی شکست استخوان ران انسان استفاده شده‌است.

لازم به ذکر است طبق مطالعات پیشین، آماده‌سازی نمونه‌های استاندارد مانند نمونه‌ی فشار- کشش^۴، SENB^۵ و یا نمونه‌ی خمش سه‌نقطه‌ای^۶ برای اندازه‌گیری خواص شکست استخوان کورتیکال^۷ تحت شرایط مختلف همچنان یک مساله‌ی مشکل و پراهمیت می‌باشد.

طبق آمار ارائه شده مبنی بر اهمیت، بررسی شکست استخوان [۱، ۲، ۴-۱۵]، هدف این پژوهش، تحلیل شکست نمونه‌های کمان- شکل^۸ استخوان کورتیکال گوساله برای چهار ناحیه‌ی آناتومیکی مختلف است. با وجود تحقیقات گسترده در زمینه‌ی آنالیز و تحلیل شکست استخوان و استفاده از نمونه‌هایی مانند فشار- کشش و خمش سه‌نقطه‌ای تحقیقات اندکی در زمینه‌ی آنالیز شکست نمونه‌های کمان- شکل انجام شده‌است. شناخت و تحلیل شکست این نوع از نمونه‌ها تحت بارگذاری کششی و تعیین فاکتور شدت تنش آن از حمله اهداف این مقاله بوده که تا کنون

¹ Chevron Notch

² Humerus

³ Ulna

⁴ Compact- Tension

⁵ Single- Edge- Notched- Bending

⁶ Three- Point Bending

⁷ Cortical Bone

⁸ Arc- Shaped Specimens

مورد بررسی قرارنگرفته است. فرضیه‌ی این پژوهش به این صورت است که آیا می‌توان از فرمول استاندارد تحلیلی برای محاسبه‌ی مقدار فاکتور شدت تنش برای تمامی نواحی آناتومیکی استفاده کرد یا باید از روش عددی بهره گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش برای انجام تست‌های آزمایشگاهی کشش از نمونه‌های کمان- شکل استفاده شده است. دلیل انتخاب این نمونه‌ها، آماده‌سازی آسان‌تر آن‌ها نسبت به سایر نمونه‌های استاندارد مانند نمونه‌ی فشار- کشش و SENB است. همچنین از آن‌جا که این نمونه‌ها بدون هیچ‌گونه ماشین کاری مورد تست مکانیکی قرار گرفته، عاری از هرگونه میکروترک احتمالی هستند، در نتیجه نسبت به سایر نمونه‌ها دقت بهتری را فراهم کرده و روند تهیه‌ی آن‌ها به مراتب آسان‌تر است.

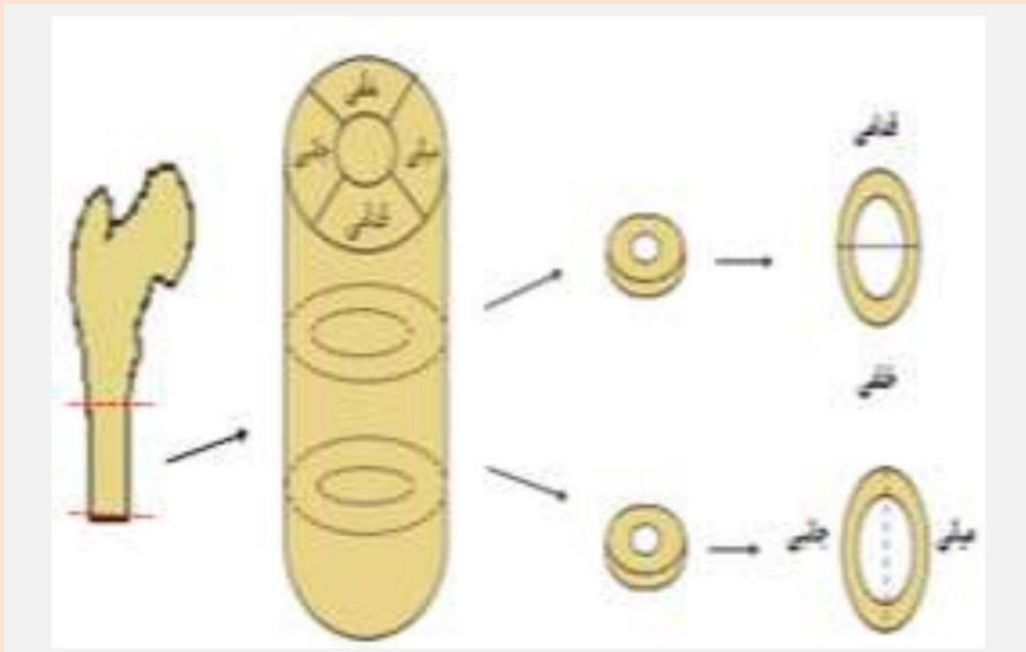
نمونه‌های کمان- شکل به ضخامت ۳ تا ۸/۵ میلی‌متر به صورت عرضی از قسمت دیافیز استخوان ران برای چهار ناحیه‌ی آناتومیکی تهیه شده است. در این پژوهش از استخوان ران گوساله استفاده شده و در طی فرآیند آماده‌سازی، دائماً اسپری آب به نمونه‌ها اعمال شده تا از خشک شدن آن‌ها جلوگیری شود. مطابق شکل (۱) از هر برش عرضی نمونه‌های قدامی و خلفی یا میانی و جانبی تهیه شده است. نمونه‌های تهیه شده شامل ۸ نمونه‌ی میانی^۱، ۶ نمونه‌ی قدامی^۲، ۴ نمونه‌ی خلفی^۳ و ۴ نمونه‌ی جانبی^۴ بوده که یک نمونه از هر کدام از ناحیه‌های آناتومیکی در شکل (۲) نشان داده شده است.

¹ Medial Specimen

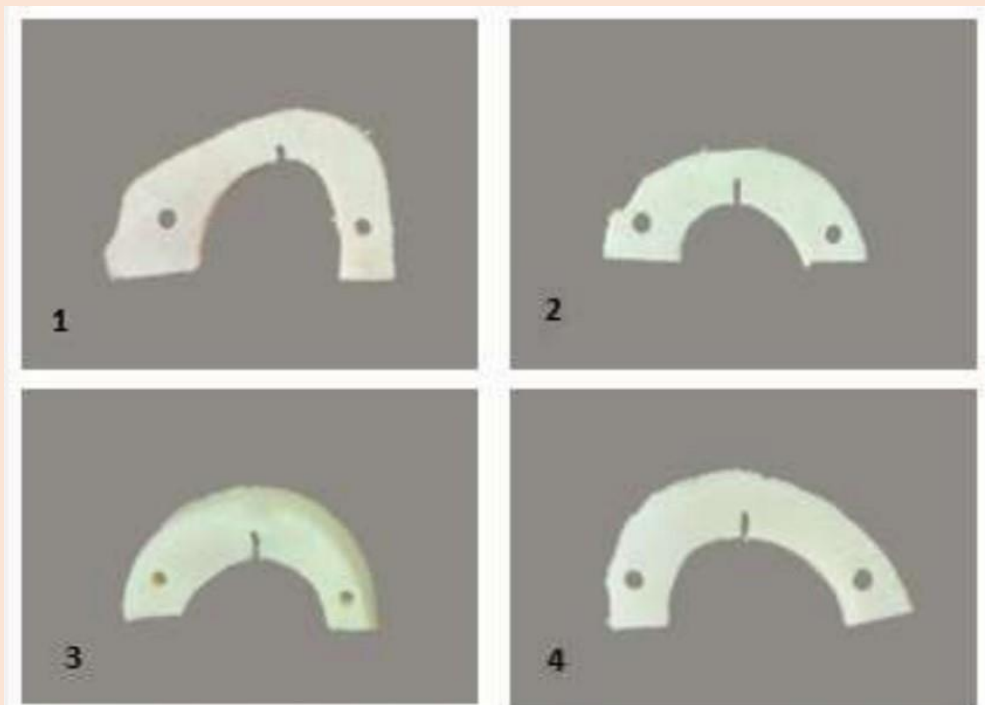
² Anterior Specimen

³ Posterior Specimen

⁴ Lateral Specimen

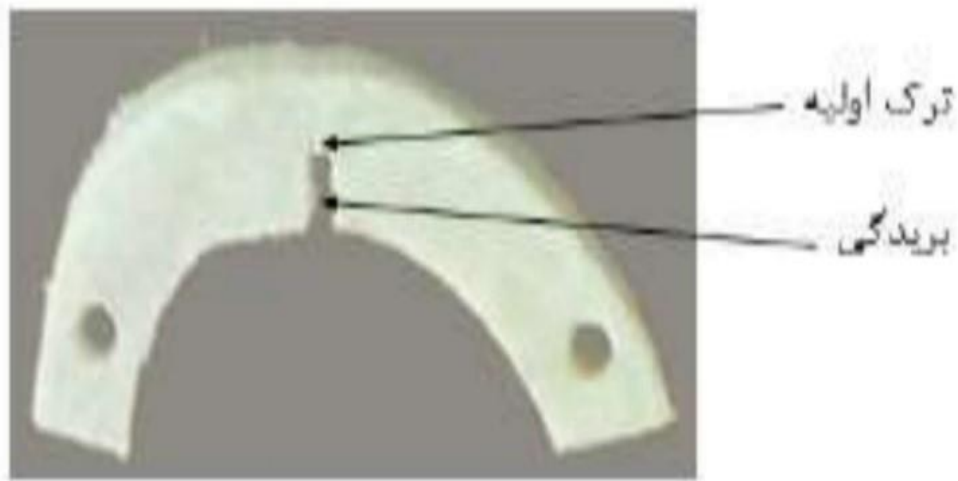


شکل (۱) - فرایند آماده‌سازی نمونه‌های کمان - شکل



شکل (۲) - نمونه‌های آناتومیکی، (۱) میانی، (۲) قدامی، (۳) خلفی، (۴) جانبی

نمونه‌ها در دو نوع سالم و با ترک اولیه، ایجاد شده‌است. با توجه به ضخامت نمونه‌ها، ایجاد ترک مناسب به دقت بالایی نیاز دارد. بدین منظور ابتدا یک بریدگی^۱ در قسمت میانی نمونه‌ها ایجاد شده و سپس برای ایجاد ترک نوک تیز در نمونه، از تیغ جراحی استفاده شده‌است [۱۶]. یک نمونه دارای بریدگی و ترک اولیه در شکل (۳) نشان داده شده‌است.



شکل (۳) - نمونه‌ی کمان - شکل با ترک اولیه، مناسب برای تحلیل تنش و کرنش در تست تجربی

۲-۲ روش برهم‌نگاری تصاویر دیجیتالی

برای صحت‌سنجی مدل‌سازی عددی از روش برهم‌نگاری تصاویر دیجیتالی^۲ برای تحلیل تنش و کرنش نمونه‌های کمان - شکل بدون ترک اولیه که مورد تست تجربی قرار گرفته‌اند استفاده شده‌است. دلیل تهیه‌ی نمونه‌های سالم و بدون ترک، استفاده از این نمونه در تحلیل تنش و کرنش است.

¹ Notch

² Digital Image Correlation

روش برهم‌نگاری تصاویر دیجیتالی یک روش مبتنی بر تصویر است که تغییرات شکل را بر اساس پردازش تصویر^۱ اندازه‌گیری می‌کند [۱۷]. این روش از الگوی لک^۲ ساخته شده‌ی دستی یا بافت طبیعی سطح قطعه به عنوان حامل اطلاعات تغییر شکل بهره برد و حرکت هر پیکسل را در تصویر مرجع^۳ و تصویر تغییر شکل یافته^۴ ردیابی می‌کند. در این روش ابتدا یک زیرمجموعه^۵ از تصویر مرجع که حاوی اطلاعات کافی از تغییرات شدت نور بوده و در محور آن یک پیکسل قرارداد انتخاب شده و سپس برای یافتن زیرمجموعه‌ای در تصویر تغییر شکل یافته با بیش‌ترین شباهت (یا کم‌ترین اختلاف) با زیرمجموعه‌ی مرجع، از یک معیار از پیش تعریف شده و یک الگوریتم بهینه‌سازی مانند معیار همبستگی متقابل^۶ یا معیار مجموع تفاوت مربعات^۷ استفاده می‌شود [۱۸]. الگوی لک برای نمونه‌ی کمان - شکل در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل (۴) - ایجاد الگوی لک روی قسمت طول موثر^۸ نمونه‌ها
(منطقه‌ای که بیشترین کششی را دارد) به منظور انجام
روش برهم‌نگاری تصاویر دیجیتالی

¹ Image Processing

² Speckle Pattern

³ Reference Image

⁴ Deformed Image

⁵ Subset

⁶ Cross- Correlation

⁷ Sum Of Squared Difference

⁸ Gage Length

۲-۳- روش تحلیلی

در این پژوهش علاوه بر اندازه‌گیری چقرمگی شکست، مقدار فاکتور شدت تنش برای ابعاد و طول ترک‌ها و سطوح بار مختلف به دو روش تحلیلی^۱ و عددی اندازه‌گیری شده است. برای اندازه‌گیری فاکتور شدت تنش برای نمونه‌های کمان- شکل از روابط استاندارد مربوط به این نمونه در تست کشش استفاده شده است [۱۹]. در این رابطه برای اندازه‌گیری فاکتور شدت تنش از ابعاد هندسه‌ی ۲۲ نمونه‌ی کمان- شکل استفاده شده است. فاکتور شدت تنش برای نمونه‌های کمان- شکل کششی با استفاده از رابطه‌ی (۱) محاسبه می‌شود.

$$k = \frac{p}{Bw^{1/2}} \left(3 \frac{x}{w} + 1.9 + 1.1 \frac{a}{w} \right) \times [1 + 0.25(1 - a/w)^2(1 - r_1/r_2)] f(a/w) \quad (1)$$

در این رابطه، P مقدار نیرو، B ضخامت نمونه، W عرض نمونه، x افسست خط بار^۲، a طول بریدگی، r₁ شعاع داخلی^۳ و r₂ شعاع خارجی^۴ است (شکل ۵) و مقدار f(a/w) با استفاده از رابطه‌ی (۲) محاسبه می‌شود.

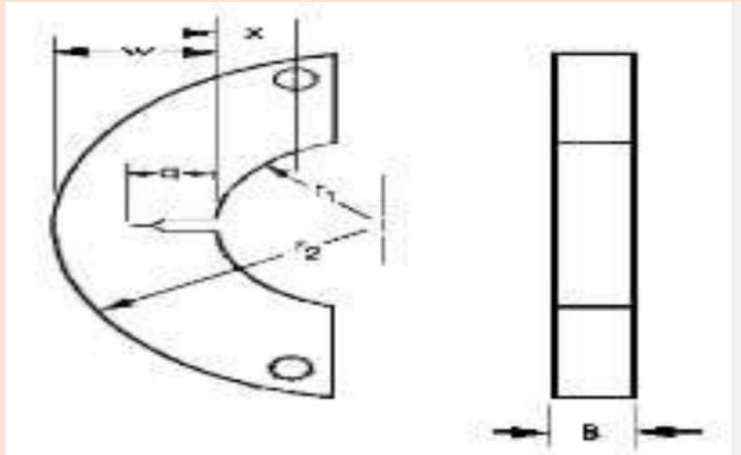
$$f(a/w) = \left[(a/w)^{1/2} (1 - a/w)^{3/2} \right] \times [3.74 - 6.3(a/w) + 6.32(a/w)^2 - 2.43(a/w)^3] \quad (2)$$

¹ Analytical Method

² Loading Line Offset

³ Inner Radius

⁴ Outer Radius



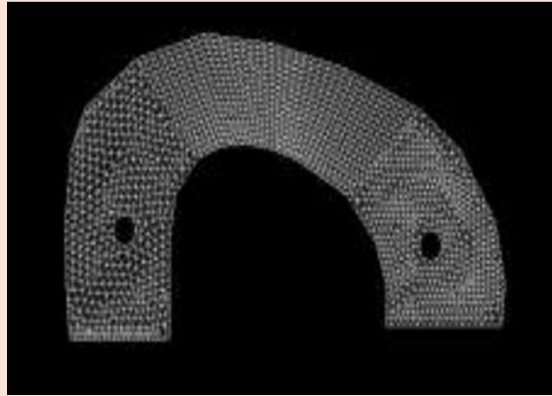
شکل (۵) - نمونه‌ی استاندارد کمان - شکل [۱۹]

۲-۴- شبیه‌سازی عددی

شبیه‌سازی عددی^۱ در این پژوهش به دو منظور انجام شده است. ابتدا شبیه‌سازی رشد ترک در مورد ترکیبی و محاسبه‌ی چقرمگی شکست با استفاده از داده‌های تست تجربی مانند طول ترک، بارگذاری، هندسه و ابعاد صورت گرفته است. سپس برای مقایسه‌ی مقادیر فاکتور شدت تنش به دو روش عددی و تحلیلی تنها از ابعاد و هندسه‌ی نمونه‌های کمان - شکل تست تجربی استفاده شده و با مقدار طول ترک و نیروی دل‌خواه و متفاوت برای هر نمونه فاکتور شدت تنش اندازه‌گیری شده و نتایج در شرایط یک‌سان از هندسه، طول ترک و بارگذاری برای هر دو روش عددی و تحلیلی باهم مقایسه شده است. برای شبیه‌سازی رشد ترک، تست تجربی روی نمونه‌ها انجام شده و به دلیل عدم تقارن در این نمونه‌ها، از شبیه‌سازی عددی نیز استفاده شده است. بدین منظور از نرم‌افزار کاسکا^۲ (یک پیش پردازگر برای ایجاد مدل اولیه) استفاده شده است. پس از تعیین هندسه‌ی اولیه و تعریف زیرناحیه، تراکم نودها برای ایجاد شبکه تعیین شده و تنها از المان مثلثی برای ایجاد شبکه‌ی مناسب استفاده شده که یک نمونه از مدل‌سازی عددی برای یکی از نواحی آناتومیکی در شکل (۶) ارائه شده است.

¹ Numerical Simulation

² Casca



شکل (۶) - مدل المان محدود نمونه‌ی کمان - شکل پیش از مدل‌سازی ترک

در ادامه برای مدل‌سازی ترک و رشد آن از نرم‌افزار فرنک دوبعدی ورژن ۴ استفاده شده است. این نرم‌افزار توسط گروه مکانیک شکست^۲ دانشگاه کرنل^۳ در آمریکا تولید شده و گسترش یافته است [۲۰]. در این پژوهش تمام مدل‌سازی‌ها به صورت دوبعدی انجام شده، تنش صفحه‌ای بود و استخوان به صورت یک ماده‌ی همگن با مدول الاستیک ۱۴ گیگاپاسکال و ضریب پواسون ۰/۳ در نظر گرفته شده است [۲۱]. با توجه به ضخامت نمونه‌ها نسبت به سایر ابعاد، فرض مدل‌سازی دوبعدی و تنش صفحه‌ای قابل قبول است. همچنین در تعیین چقرمگی شکست، شرایط مرزی و نیروها متناسب با تست تجربی کشش اعمال شده است. نیرو در یکی از دایره‌ها، در جهت محور X و به صورت کششی و شرایط مرزی در دایره‌ی دیگر، در نیمی از دایره در جهت محور X و Y اعمال شده است. در محاسبه‌ی فاکتور شدت تنش، نیروی فرضی و دل‌خواه یک‌سان در هر دو روش عددی و تحلیلی جهت مقایسه‌ی نتایج حاصل از این دو روش اعمال شده است. از آن‌جا که در این تحلیل تاثیر خواص مکانیکی در شکست استخوان بررسی نشده و هدف مقایسه‌ی نتایج حاصل از استفاده از فرمول تحلیلی و حل عددی در نمونه‌های مختلف بوده، در نظر گرفتن مدول یک‌سان خطا ایجاد نمی‌کند. در نهایت تحلیل تنش الاستیک خطی با استفاده از حل گر حذف

¹ FARNC2D V4.0

² Fracture Mechanics Group

³ Cornell University

مستقیم^۱ و سپس پس پردازش^۲ انجام شده که در این مرحله از شبکه‌ی تغییر شکل یافته برای بررسی صحت شرایط مرزی اعمالی استفاده شده است.

پس از شبیه‌سازی اولیه مدل و اعمال نیروها و شرایط مرزی، در مرحله نهایی پس از تعیین مکان شروع ترک، موقعیت نوک ترک^۳ و المان‌های سینگولار^۴ و واسط، یک ترک لبه‌ای از نوع TRACTION FREE مطابق با اندازه‌ی ترک در تست تجربی در قسمت میانی نمونه ایجاد شده است. در مدل‌سازی‌های المان محدود از المان‌های سینگولار برای تحلیل نوک ترک استفاده شده و باعث ایجاد المان‌های واسط و سینگولار گشته، برابر با ۳ بوده که این تعداد تابعی از تراکم شبکه‌ی موضعی است. پس از ایجاد ترک و تعیین روش اتوماتیک^۵ مطابق شکل (۷)، رشد ترک صورت گرفته و مقدار چقرمگی شکست اندازه‌گیری شده است. برای رشد ترک روش‌های مختلفی از جمله STAND^۶، COHESV^۷، (برای رشد ترک چسبنده در مواردی مانند سنگ^۸ و بتن^۹)، INTFC^{۱۰} و AUTOMATIC وجود دارد که در این مطالعه از روش اتوماتیک استفاده شده است که در آن با توجه به هندسه، بار و شرایط مرزی، الگوی شبکه‌ی مناسب توسط نرم‌افزار تعیین می‌شود. همچنین در این بخش به منظور محاسبه‌ی فاکتور شدت تنش، مدل‌سازی عددی با طول ترک فرضی و متفاوت در هر یک از نمونه‌ها صورت گرفته و تحلیل تنش و کرنش نیز در نرم‌افزار فرنک دو بعدی برای نمونه‌های بدون ترک انجام شده است تا با نتایج تحلیل تنش و کرنش به روش برهم‌نگاری تصاویر دیجیتالی مقایسه شود.

¹ Direct Elimination

² Post- Processing

³ Crack Tip

⁴ Singular Elements

⁵ Automatic

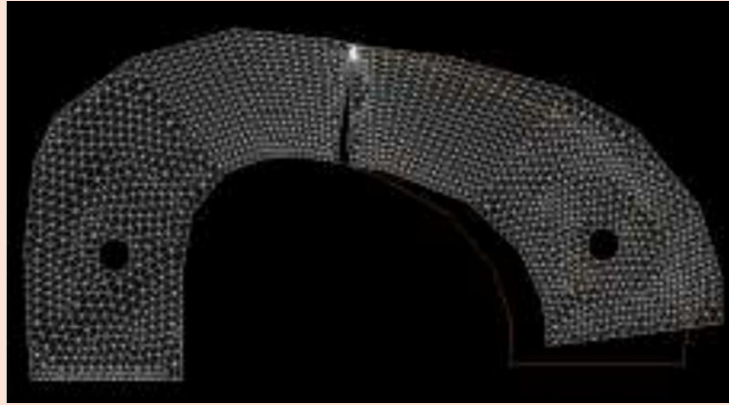
⁶ Standard

⁷ Cohesive

⁸ Rock

⁹ Concrete

¹⁰ Interface



شکل (۷) - مدل المان محدود نمونه کمان - شکل پس از تعریف شروع و رشد ترک

۳- یافته‌ها و بحث

در مجموع نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی رشد ترک نشان می‌دهد که در ابتدا رشد به صورت Self- similar بوده اما در ادامه رشد ترک به دلیل عدم تقارن تغییر کرده و به صورت مود ترکیبی درآمده که مطابق شکل (۸)، نتایج حاصل از روش عددی تطابق خوبی با نتایج تست تجربی داشته است.



(۱)

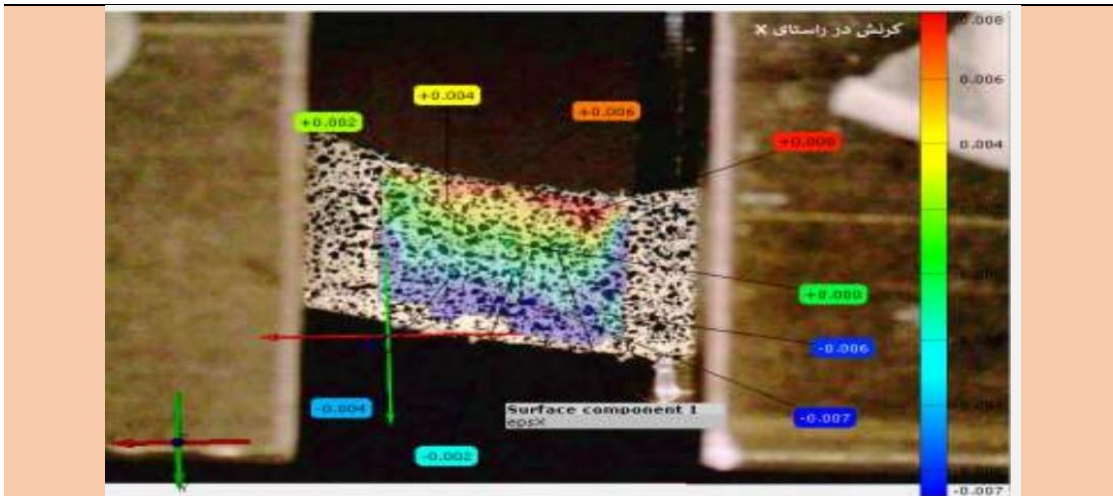


(۲)

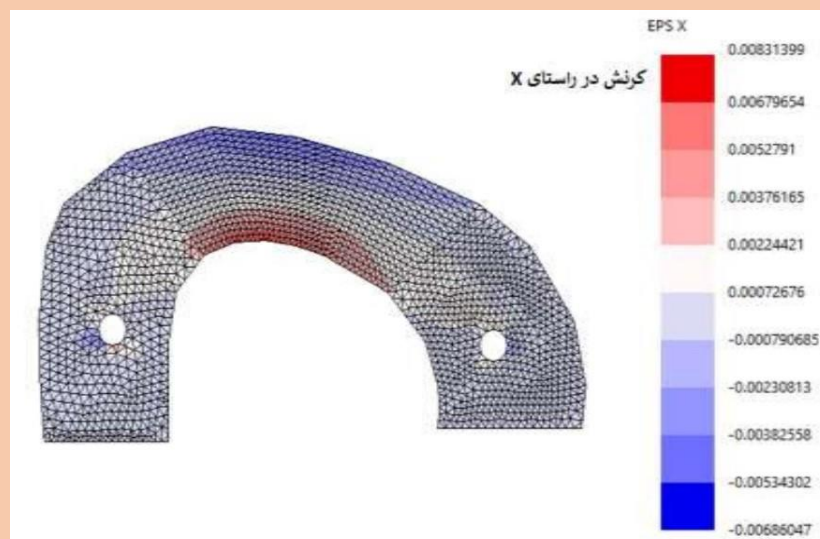
شکل (۸) - مقایسه‌ی شروع و رشد ترک حاصل از: (۱) شبیه سازی عددی و
(۲) تست تجربی

۳-۱- صحت‌سنجی روش عددی

نتایج حاصل از تحلیل تنش و کرنش به دو روش تجربی و عددی (شکل‌های ۹ و ۱۰)، تطابق بسیار خوبی را نشان داده که بیان‌گر صحت شبیه‌سازی عدد برای نمونه‌های کمان- شکل می‌باشد. در این بخش از آن‌جا که هدف مقایسه و اعتبار‌سنجی می‌باشد، کرنش در راستای X اندازه‌گیری شده است.



شکل (۹) - نتایج کرنش اندازه‌گیری شده با استفاده از تحلیل تجربی در روش برهم‌نگاری تصاویر دیجیتالی



شکل (۱۰) - نتایج کرنش اندازه‌گیری با استفاده از نتایج تحلیل در شبیه‌سازی عددی

۳-۲- چقرمگی شکست

نحوه‌ی آماده‌سازی، ابعاد نمونه‌ها و ایجاد ترک نوک تیز پیش‌تر بیان شده است. با توجه به تنش سیلان MPa $\sigma_{ys} = 130$ و چقرمگی شکست^۱ $MPam^{1/2}$ برای بافت کورتیکال استخوان گوساله [۲۷] و تعیین ضخامت بر اساس $b > 2/5(k_{Ic}/\sigma_{ys})^2$ ، مقادیر در نظر گرفته شده برای ضخامت نمونه‌ها معتبر می‌باشد. با توجه به رفتار ترد بافت کورتیکال، میزان حداکثر بار در هر تست برای محاسبه‌ی چقرمگی در نظر گرفته شده است. مقادیر متوسط میزان چقرمگی شکست برای نواحی آناتومیکی قدامی، خلفی، میانی و جانبی به ترتیب برابر با ۳/۵، ۳/۸۸، ۱/۵ و ۱/۳۵ $MPam^{1/2}$ به دست آمده است که تطابق خوبی با نتایج سایر مطالعات دارد [۵، ۹]. نالا و هم‌کارانش مقدار چقرمگی شروع ترک^۲ در استخوان انسان را برابر با $MPam^{1/2}$ گزارش کردند [۲۲]. نورمن و هم‌کارانش مقدار چقرمگی شکست برای نمونه‌هایی به ضخامت ۲ و ۳ میلیمتر را به ترتیب برابر با ۴/۳۲ و ۴/۰۵ $MPam^{1/2}$ به دست آوردند [۲۳]. نالا و هم‌کارانش اثر سن روی چقرمگی شروع و رشد ترک در استخوان انسان را بررسی کرده و مقدار متوسط چقرمگی شروع ترک را برابر با $MPam^{1/2}$ ۲/۰۷ گزارش کردند [۲۴]. مقدار چقرمگی شکست در مود ۱ در استخوان ران گوساله در جهت عرضی با نمونه‌ی فشار- کشش برابر با ۴-۶ $MPam^{1/2}$ [۲۵] و در جهت طولی با نمونه‌ی SENB برابر با ۳/۲۱-۵/۰۵ $MPam^{1/2}$ به دست آمده است. کری و هم‌کارانش مقدار متوسط چقرمگی شکست برای شکستگی طولی در استخوان ران انسان با استفاده از نمونه‌های SENB را برابر با $MPam^{1/2}$ ۶/۴ اندازه‌گیری کردند [۶].

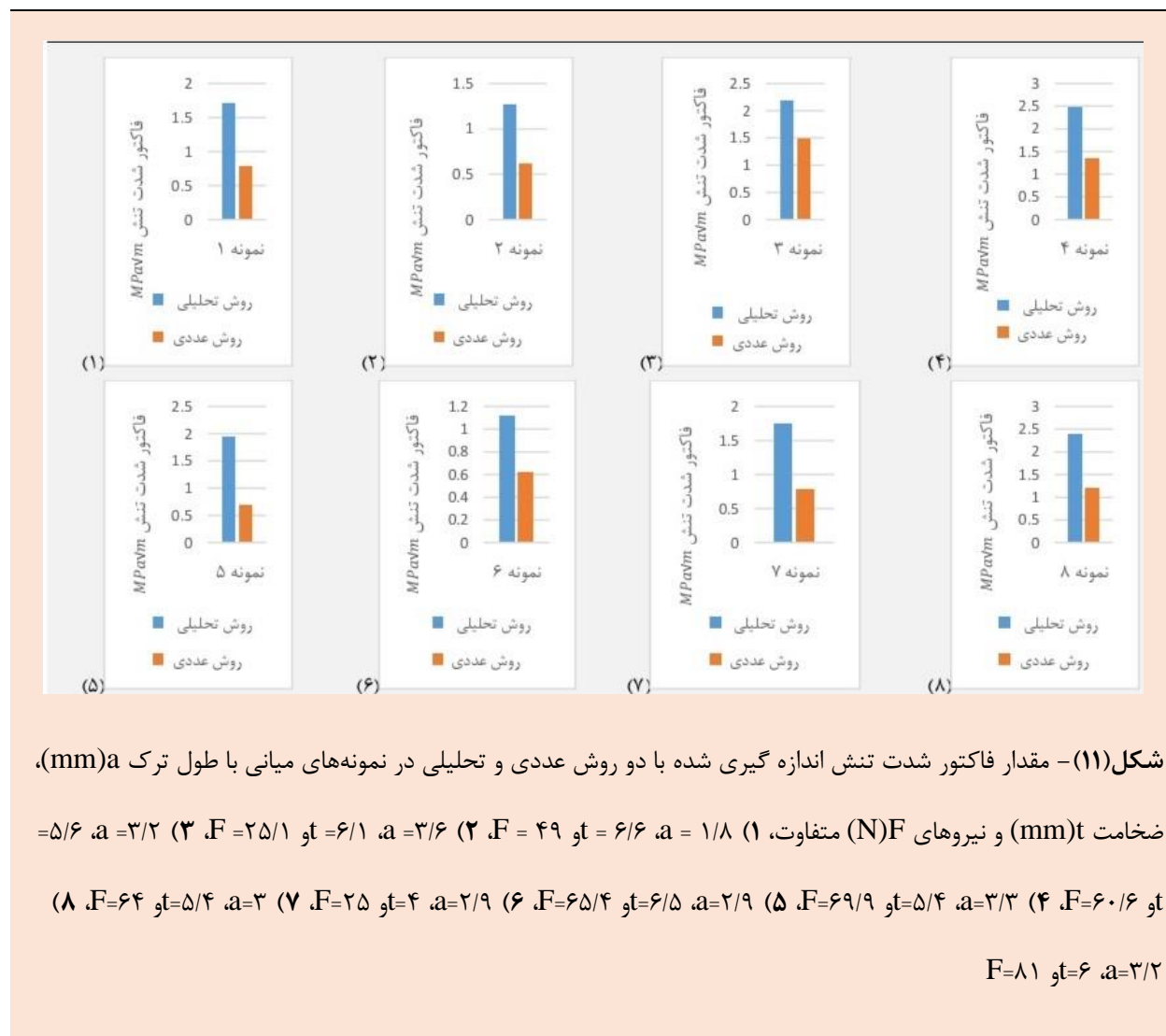
دلیل اصلی وجود تفاوت در بعضی از این نتایج، استفاده از روش‌های تست مکانیکی مختلف و یا شرایط تست مختلف [۲۶] بوده و سایر عوامل نظیر سن و جنس نمونه‌های استخوانی نیز در تعیین میزان چقرمگی شکست تاثیر دارند [۲۴].

¹ Fracture Toughness

² Crack- Initiation Toughness

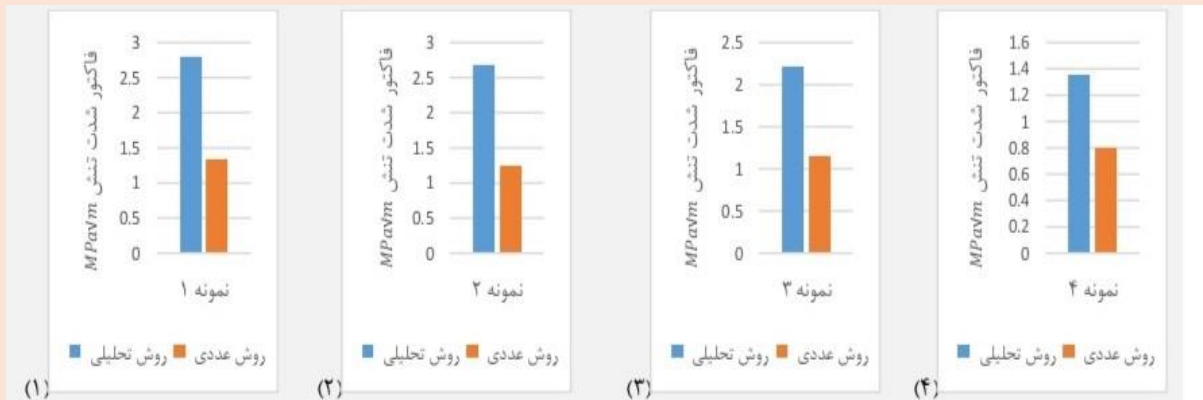
۳-۳- فاکتور شدت تنش

برای بررسی مناسب بودن نمونه‌های کمان- شکل برای تعیین فاکتور شدت تنش^۱، نتایج حاصل برای تمام نمونه‌ها با دو روش تحلیلی و عددی در شکل‌های (۱۱- ۱۴) مقایسه شده است. برای اندازه‌گیری فاکتور شدت تنش از هندسه و ابعاد نمونه‌های کمان- شکل در تست تجربی استفاده شده اما در هر یک از نمونه‌ها طول ترک و نیرو به صورت اختیاری اعمال شده است. به ازای طول ترک، ابعاد و نیروی یکسان برای هر دو روش، مقدار فاکتور شدت تنش اندازه گیری و باهم مقایسه شده است.

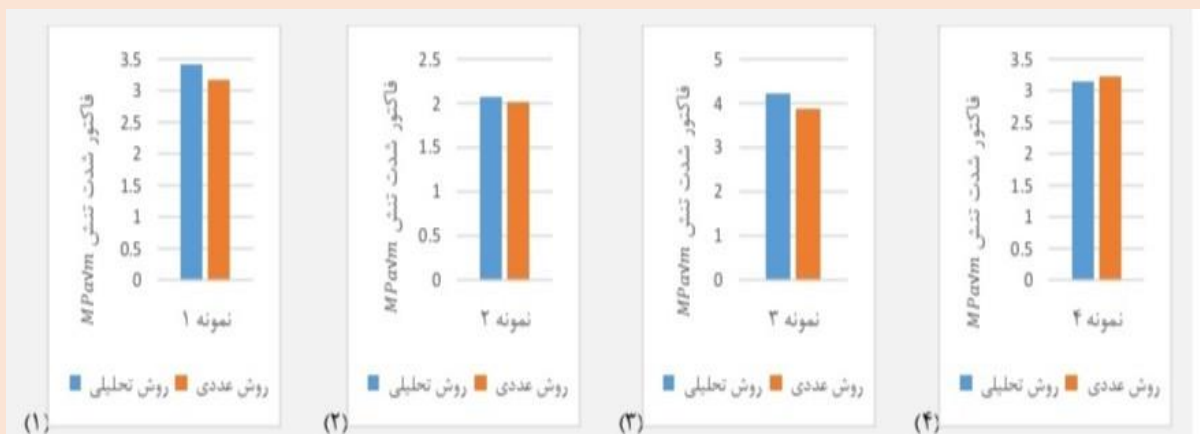


شکل (۱۱) - مقدار فاکتور شدت تنش اندازه گیری شده با دو روش عددی و تحلیلی در نمونه‌های میانی با طول ترک a (mm)، ضخامت t (mm) و نیروهای $(N)F$ متفاوت، (۱) $a = 1/8$, $t = 6/6$ و $F = 49$ (۲) $a = 3/6$, $t = 6/6$ و $F = 49$ (۳) $a = 3/2$, $t = 5/6$ و $F = 25/1$ (۴) $a = 3/3$, $t = 5/4$ و $F = 60/6$ (۵) $a = 2/9$, $t = 5/4$ و $F = 69/9$ (۶) $a = 2/9$, $t = 6/5$ و $F = 65/4$ (۷) $a = 3$, $t = 4$ و $F = 25$ (۸) $a = 3/2$, $t = 6$ و $F = 81$

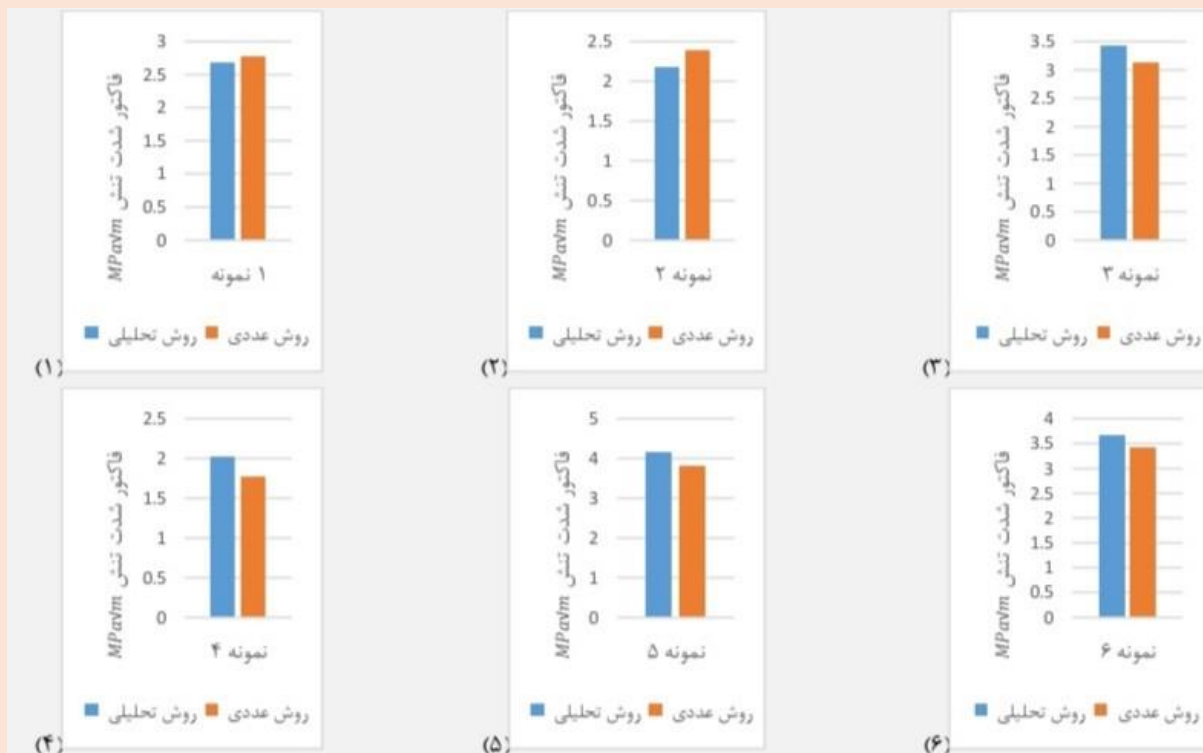
¹ Stress Intensity Factor



شکل (۱۲) - مقدار قاکتور شدت اندازه گیری شده با دو روش عددی و تحلیلی در نمونه‌ی جانبی با طول ترک a (mm)، ضخامت t (mm) و نیروهای $(N)F$ متفاوت، (۱) $a = 4/1$, $t = 8/6$ و $F = 50/1$ (۲) $a = 3/3$, $t = 8/1$ و $F = 86$ (۳) $a = 3$, $t = 5/8$ و $F = 42/6$ (۴) $a = 4/5$, $t = 5/9$ و $F = 78/9$



شکل (۱۳) - مقدار قاکتور شدت اندازه گیری شده با دو روش عددی و تحلیلی در نمونه‌ی خلفی با طول ترک a (mm)، ضخامت t (mm) و نیروهای $(N)F$ متفاوت، (۱) $a = 3/9$, $t = 7$ و $F = 148$ (۲) $a = 3$, $t = 5$ و $F = 48$ (۳) $a = 3/8$, $t = 7/8$ و $F = 34/3$ (۴) $a = 4/1$, $t = 3/1$ و $F = 175/4$



شکل (۱۴) - مقدار فاکتور شدت تنش اندازه گیری شده با دو روش عددی و تحلیلی در نمونه‌ی قدامی با طول ترک a (mm)، ضخامت t (mm) و نیروهای $(N)F$ متفاوت، (۱) $a = 2/7$, $t = 5$ و $F = 71/9$ (۲) $a = 3$, $t = 4$ و $F = 46$ (۳) $a = 3/2$, $t = 4/4$ و $F = 87$ (۴) $a = 3/1$, $t = 4/5$ و $F = 53$ (۵) $a = 3$, $t = 6/4$ و $F = 125/1$ (۶) $a = 3/3$, $t = 6/3$ و $F = 126$

دلیل وجود اختلاف در مقادیر فاکتور شدت تنش بین دو روش تحلیلی و عددی برای نمونه‌های میانی و جانبی، انحراف نسبی هندسه‌ی آن‌ها از نمونه‌ی استاندارد است. به دلیل شباهت زیاد نمونه‌های کمان - شکل در نواحی خلفی و قدامی با نمونه‌ی استاندارد، نتایج فاکتور شدت تنش محاسبه شده با دو روش تحلیلی و عددی برای این دو ناحیه باهم مشابه است.

نتایج به دست آمده در این مطالعه توافق خوبی با نتایج میرزائی و هم‌کارانش دارد [۱۶]. در مقاله‌ی آن‌ها از استخوان ران انسان برای تهیه‌ی نمونه‌های کمان - شکل در تست مکانیکی شکست استفاده شده و از نمونه‌های کمان - شکل به دست آمده از نواحی آناتومیکی قدامی و خلفی (به دلیل بیش‌ترین شباهت این نمونه‌ها با نمونه‌ی استاندارد کمان - شکل) بهره گرفته شده که با نتایج پژوهش حاضر سازگار است.

از جمله نوآوری‌های پژوهش حاضر می‌توان به استفاده از تکنیک برهم‌نگاری تصویر دیجیتال در تحلیل تنش نمونه‌های کمان- شکل بدون ترک تحت آزمون کشش، استخراج داده‌های تجربی و تحلیل مکانیکی شکست از نمونه‌های بدون ماشین‌کاری و با هندسه‌ی اولیه اشاره کرد.

براساس تست‌های تجربی و مدل‌سازی عددی برای تحلیل شکست استخوان کورتیکال، نشان داده شده است که به دلیل عدم تقارن نمونه‌های کمان- شکل، رشد ترک ابتدا به صورت مود ۱ بوده و با افزایش عدم تقارن نمونه‌ها، رشد ترک به صورت مود ترکیبی می‌باشد.

مقدار چقرمگی شکست اندازه‌گیری شده برای استخوان کورتیکال در این مطالعه تطابق خوبی با پژوهش‌های پیشین دارد. همچنین بنا بر مقدار فاکتور شدت تنش محاسبه شده با دو روش تحلیلی و عددی می‌توان برای جهت‌های آناتومیکی قدامی و خلفی از رابطه‌ی استاندارد تحلیلی برای به‌دست آوردن فاکتور شدت تنش استفاده کرد، در صورتی که برای نواحی آناتومیکی میانی و جانبی، به دلیل اختلاف نتایج عددی و تحلیلی نمی‌توان از رابطه‌ی استاندارد تحلیلی استفاده نمود.