

## مدل‌سازی و تحلیل دو بعدی شکست در پوشش چندلایه‌ای نانوساختار بر پایه‌ی کروم و تیتانیوم با نرم‌افزار آباکوس

غلامرضا فغانی<sup>۱</sup>، مهدی عاملی<sup>۲</sup>

۱- استادیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه پدافند هوایی خاتم‌الانبیاء(ص)، تهران، ایران، [gfaghani@yahoo.com](mailto:gfaghani@yahoo.com)

۲- کارشناسی ارشد، دانشکده برق، دانشگاه شاهد، تهران، ایران، [mahdi.dezful60@gmail.com](mailto:mahdi.dezful60@gmail.com)

### چکیده

در مقاله حاضر مدل‌سازی و تحلیل دو بعدی رفتار شکست با دو روش حداکثر تنش بحرانی و بررسی شکست رشد ترک با ایجاد پیش‌ترک لبه‌ای در قطعات پوشش‌دهی شده به روش رسوب فیزیکی فاز بخار از نوع تبخیری قوس کاتدی، انجام شد. نوآوری مقاله حاضر، بررسی رفتار شکست و رشد ترک بین لایه‌ای و درون لایه‌ای پوشش‌های چندلایه نانو ساختار  $TiN/CrN$  برای اولین بار و مقایسه آن با رفتار پوشش‌های تک‌لایه‌ای  $TiN$  و  $CrN$  بوده است. تحلیل بر روی پوشش‌های سخت تک‌لایه‌ای  $TiN$  و  $CrN$  و چندلایه‌ای نانو ساختار  $TiN/CrN$  رسوب داده شده بر روی فولاد  $420C$  در محیط اجزای محدود نرم‌افزار آباکوس صورت گرفت. در این بررسی، نتایج مربوط به هر یک از دو روش تحلیل، برای سه نمونه دارای پوشش‌هایی با ضخامت یکسان و چیدمان و جنس متفاوت شامل  $Steel/Ti/TiN$ ،  $Steel/Cr/CrN$  و  $Steel/Ti/15[TiN/CrN]$  با یکدیگر مقایسه شد. در این مقایسه، تنش‌های برشی و پوست‌کنی، ضریب شدت تنش مؤثر و انتگرال  $J$  مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان‌دهنده حساسیت بالاتر به رشد ترک در نواحی دو ماده‌ای درون پوشش‌ها بود، طوری که مرزهای بین لایه‌ای  $TiN/CrN$  و  $Cr/CrN$ ،  $Ti/TiN$  نواحی بحرانی از دیدگاه مکانیک شکست شناخته شدند. همچنین با در نظر گرفتن نتایج بررسی، تأثیر پارامترهایی نظیر فاصله‌ی ترک تا سطح پوشش، جنس و تعداد لایه‌های پوشش بر مقدار انتگرال  $J$  بهینه بودن پوشش  $Ti/TiN$  نسبت به سایر پوشش‌ها تأیید گردید.

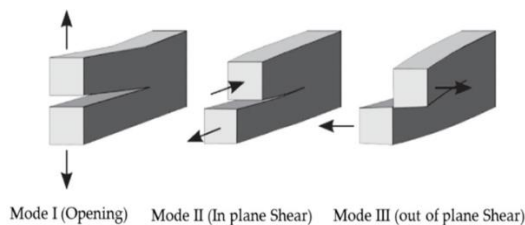
**واژه‌های کلیدی:** پوشش‌های نانو ساختار، شبیه‌سازی اجزای محدود، مکانیک شکست الاستیک خطی (LEFM)، ضریب شدت تنش، انتگرال  $J$ .

### مقدمه

پوشش‌ها می‌شود [۳]. از طرفی وجود تنش‌های اضافی، منجر به خمیده شدن پوشش‌ها می‌گردد. اکبرزاده و همکاران، شبیه‌سازی تنش‌های پسماند در پوشش‌های لایه نازک  $TiN$  و  $CrN$  ایجاد شده توسط روش رسوب فیزیکی بخار را با استفاده از روش اجزای محدود مورد بررسی قرار داده و میزان بهینه‌ی تنش در هر پوشش را بدست آوردند [۴]. وجود ترک و شکستگی اولیه در مواد مهندسی امری اجتناب‌ناپذیر و از ویژگی‌های خاص هر ماده است، که سبب می‌شود سازه‌ها، تحت بارهای مکانیکی یا سایر عوامل محیطی سریع‌تر گسیخته شوند [۵]. در گذشته، طراحی‌های مهندسی تنها براساس تئوری الاستیسیته و مفهوم مقاومت مواد انجام می‌گرفت. لذا وجود نقایص ساختاری، ریزترک‌ها و امکان رشد یک ترک منفرد در محاسبات وارد نمی‌شد. اما پس از بروز حوادثی مانند دو نیم شدن یک تانکر نفتکش و جدایی بخشی از سقف یک هواپیما، صحت و اطمینان این طراحی‌ها با

در سال‌های اخیر، افزایش تقاضا در زمینه‌ی محصولات با دانسیته‌ی توان بالاتر، طراحی‌های متراکم‌تر، مصرف سوخت کمتر و قابلیت اطمینان بیشتر موجب شد تا ضرورت استفاده از پوشش‌های نانو ساختار و کامپوزیتی در صنایع هوافضا، پزشکی و ... بیشتر نمایان گردد. به دلیل خواص مکانیکی فوق‌العاده (به‌ویژه سختی و چقرمگی فوق‌العاده) و خنثی بودن شیمیایی، این پوشش‌ها می‌توانند به‌طور قابل ملاحظه‌ای اصطکاک و اتلاف حاصل از سایش را کاهش و علاوه بر آن مقاومت به خستگی و خوردگی را افزایش دهند [۱]. تحقیقات نشان می‌دهد، کنترل متغیرهای پوشش‌دهی، تأثیر مهمی بر ساختار و خواص پوشش‌های مذکور مانند سختی، نرخ ترک خوردگی و مقاومت خستگی و ... دارد [۲]. یکی از مهمترین مزایای این پوشش‌ها، نحوه‌ی توزیع تنش‌های فشاری است که باعث جلوگیری از انتشار ترک در این نوع

تنش است که مقاومت یک سازه در برابر رشد ترک را نشان می‌دهد. در کاربردهای عملی فاکتور شدت تنش، بررسی رفتار سازه‌ها دارای شکستگی، به کمک مبانی مکانیک شکست امکان‌پذیر است. بر این اساس، هنگامی که یک قطعه ترک‌دار در معرض بار خارجی قرار گیرد، تمرکز تنش زیادی در اطراف نوک ترک ایجاد می‌شود. هرگاه این تنش متمرکز شده به مقدار بحرانی برسد، باعث شکست قطعه می‌شود [۹].



شکل ۱: مدهای اصلی انتشار ترک [۶]

فاکتورهای  $K_1$ ،  $K_2$  و  $K_3$  به وضعیت مرزهای خارجی وابسته هستند، که بارگذاری و هندسه‌ی فاکتور شدت تنش نامیده می‌شود. در مکانیک شکست فاکتور شدت تنش درجه تمرکز تنش در نوک یک ترک طولی را می‌دهد که بعد آن به صورت  $MPa \sqrt{m}$  بیان می‌شود.

$$K_{1,2,3} = \sigma_A \sqrt{\pi \times a} = \sigma_{ij} \sqrt{2\pi \times r_i} \text{ For } \theta = 0 \quad (1)$$

$\sigma_A$  تنش اعمال شده و  $a$ ، طول ترک است و می‌توان با داشتن فاکتور شدت تنش، به بررسی مسیر رشد ترک در نمونه پرداخت [۸]. شکست و رشد ترک زمانی اتفاق می‌افتد که مقدار پارامترهایی نظیر تنش، کرنش و انرژی در اطراف نوک ترک به مقدار بحرانی خود که معمولاً مشخصه‌ی ذاتی هر ماده ترک‌دار است، برسد. مهم‌ترین پارامتری که در مکانیک شکست مطرح است، ضریب شدت تنش می‌باشد، به گونه‌ای که می‌توان حوزه‌ی تنش، کرنش و انرژی اطراف نوک ترک را برحسب این ضریب بیان نمود. در نتیجه، یکی از مهم‌ترین مراحل در تحلیل شکست و رفتار رشد ترک براساس مبانی مکانیک شکست، بررسی این پارامتر است. به همین دلیل باید برای انواع ترک‌های موجود در سازه‌های ترک‌دار، این ضریب محاسبه و تحلیل شود [۱۰]. با تعیین ضرایب شدت تنش مود ترکیبی، می‌توان به نوع رفتار کششی و برشی قطعات که موجب شکست می‌شود، پی برد. از آن‌جا که مطالعه‌ی تجربی شکست قطعات واقعی هزینه‌بر و دشوار است، روش‌های عددی متنوعی برای شبیه‌سازی رشد ترک در مواد توسعه داده شده‌اند. این روش‌ها، شامل روش المان محدود (FEM)، روش المان مرزی (BEM) و روش المان مجزا (DEM) می‌باشند. روش المان محدود، یکی از روش‌های مناسب برای بررسی و تعیین ضرایب شدت تنش است. نرم‌افزارهای قدرتمندی بر مبنای المان محدود تولید شده‌اند که از جمله‌ی بهترین آن‌ها، نرم‌افزار آباکوس را می‌توان نام برد. این نرم‌افزار با استفاده از روش انتگرال  $J$ ، ضرایب شدت تنش را محاسبه می‌کند [۱۱]. انتگرال  $J$ ، انتگرالی خطی است که روی هر منحنی دلخواه

تردید مواجه شد. در دهه‌ی دوم قرن بیستم، علم جدیدی به نام مکانیک شکست پایه‌گذاری شد که تجزیه و تحلیل سازه‌ها را بر مبنای وجود ترک در آن‌ها بررسی می‌کرد [۶]. به عنوان نمونه، در تحقیقی چنگ و همکاران توانستند با روش المان محدود و نرم‌افزار آباکوس، با ایجاد ترک لبه‌ای، انتگرال  $J$  را برای ترک لبه‌ای در نمونه‌ی آلومینیم آلیاژی که به‌روش اکسیداسیون میکرو آرک با سرامیک پوشش‌دهی شده بود، بررسی و همچنین رابطه‌ی بین انتگرال  $J$ ، طول ترک و ضخامت پوشش را محاسبه کنند [۷]. نوآوری مقاله حاضر، بررسی رفتار شکست و رشد ترک بین لایه‌ای و درون لایه‌ای پوشش‌های چندلایه نانوساختار TiN/CrN برای اولین بار و مقایسه آن با رفتار پوشش‌های تک‌لایه‌ای CrN و TiN و دستیابی به چیدمان و جنس بهینه از بین پوشش‌های نانوساختار تک‌لایه‌ای TiN و CrN و چندلایه‌ای نانوساختار TiN/CrN با روش المان محدود و در نظر گرفتن معیار حداکثر تنش بحرانی و محاسبه‌ی ضریب شدت تنش مؤثر و انتگرال  $J$  است.

## شرح مسئله

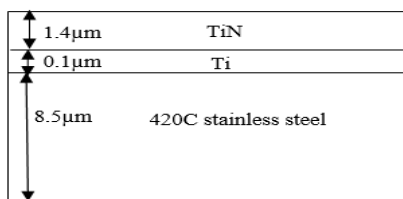
مکانیک شکست پایه به دو بخش کلی مکانیک شکست الاستیک خطی (LEFM) و مکانیک شکست الاستیک پلاستیک (EPFM) تقسیم‌بندی می‌شود. نمایان شدن معادل‌های  $G$  و  $K$  براساس رشته‌ی مکانیک الاستیک خطی ارائه شده است. چرا که شکل توزیع تنش در اطراف و نزدیک نوک ترک همیشه یکسان است. بر این اساس، تأثیر بارهای اعمال شده بر گسترش ترک را می‌توان به‌صورت الگویی از پارامترهای ویژه بیان کرد که مشخص‌کننده‌ی شدت تنش-کرنش در نزدیکی نوک ترک می‌باشد. در مکانیک شکست الاستیک خطی (LEFM)، ابتدا فرض بر این است که مواد، الاستیک خطی و ایزوتروپ هستند. با این فرض، حوزه‌ی تنش در نزدیکی نوک ترک با استفاده از تئوری الاستیسیته محاسبه می‌شود. زمانی که تنش‌های نزدیک به نوک ترک از مقدار فاکتور شدت تنش مواد بیشتر شود، ترک رشد می‌کند [۸]. با توجه به نحوه‌ی اعمال بار خارجی، رشد ترک تحت سه مود اساسی شکست رخ می‌دهد. مود اول یا مود بازشدگی، متداول‌ترین فرم گسیختگی در اثر رشد ترک است. در این مود، سطوح ترک نسبت به صفحات به طور عمود بر هم در جهت مخالف یکدیگر تغییر مکان می‌دهند و تنش کششی، عمود بر صفحه ترک است. مود دوم یا مود برشی، که در آن دو سطح ترک نسبت به هم در جهت عمود بر خط نوک ترک می‌لغزند و تنش برشی موازی با صفحه‌ی ترک و عمود بر جبهه‌ی ترک است. مود سوم یا مود پارگی، که در آن لغزش دو صفحه‌ی ترک در جهاتی به موازات خط پروقیل ترک اتفاق می‌افتد و تنش برشی موازی با صفحه‌ی ترک و موازی با جبهه‌ی ترک است. در شکل ۱، انواع مود انتشار ترک، نشان داده شده است [۶]. یکی از پارامترهای مهم که اهمیت به‌سزایی در مکانیک شکست سازه‌ها دارد، فاکتور شدت

### روش حل

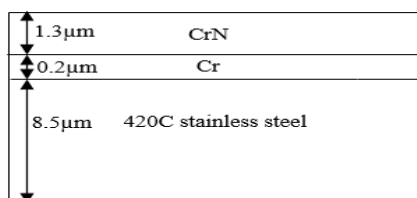
زمانی که به حل صحیح و همراه با جزئیات در ناحیه‌ای موضعی از مدل نیاز است، استفاده از تکنیک زیرمدلسازی<sup>۱</sup> بسیار مؤثر خواهد بود. به همین دلیل در این تحقیق، از این روش استفاده شد. ابتدا مدل را با استفاده از یک مش بندی درشت آنالیز کرده، سپس از نتایج به دست آمده از آنالیز اولیه، جهت بررسی ناحیه‌ی محلی با مش و هندسه‌ی بهبود یافته استفاده گردید. در این روش نتایج در مدل عمومی میان‌بایی و از آن برای تعریف شرایط مرزی مناسب در زیرمدل استفاده شد.

### هندسه‌ی نمونه‌ها

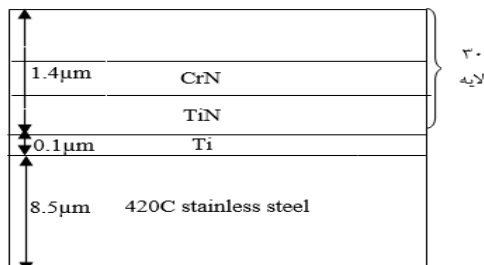
برای تمامی نمونه‌ها، شبیه‌سازی در یک پارت انجام و جزو فرضیات مسئله محسوب شد. بنابراین برای ساده‌سازی از ایجاد تماس بین لایه‌ها صرف‌نظر گردید. دلیل این انتخاب، چسبندگی مطلوب پوشش‌ها به روش رسوب فیزیکی فاز بخار بر روی یکدیگر است. با توجه به نتایج تصاویر FE-SEM، نحوه‌ی مدل‌سازی نمونه‌ی فولاد زنگ‌نزن ۴۲۰C با سه نوع پوشش مختلف، به صورت شکل‌های ۳، ۴ و ۵ می‌باشد.



شکل ۳: شماتیک نمونه‌ی Steel/Ti/TiN



شکل ۴: شماتیک نمونه‌ی Steel/Cr/CrN



شکل ۵: شماتیک نمونه‌ی Steel/Ti/15[TiN/CrN]

بسته، که از یک لبه‌ی ترک شروع شده و به لبه‌ی دیگر آن منتهی می‌گردد، تعریف شده و مقدار این انتگرال برای این منحنی‌ها ثابت است. در برخی از نرم‌افزارهای مهم اجزای محدود مانند آباکوس، مقدار انتگرال  $J$  به‌طور مستقیم با نرم‌افزار قابل محاسبه است. پس از تعیین مقدار  $J$  با کمک رابطه‌ی بین  $J$  و ضرایب شدت تنش، می‌توان مقدار  $K_1$  و  $K_2$  را از روابط ۲ و ۳ تعیین نمود [۱۳-۱۲]:

$$K_1 = \sqrt{\frac{JE'}{1 + R_\Delta^2}} \quad (2)$$

$$K_2 = R_\Delta K_1 \quad (3)$$

$$R_\Delta = \left| \frac{U_1(x, 0^+) - U_1(x, 0^-)}{U_2(x, 0^+) - U_2(x, 0^-)} \right| \quad (4)$$

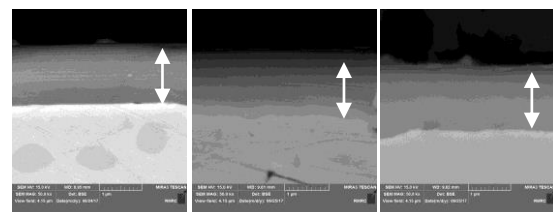
تنش صفحه‌ای:  $E = E'$

کرنش صفحه‌ای:  $E' = \frac{E}{1 - \theta^2}$

$E$ ، مدول الاستیسیته و  $\theta$ ، ضریب پواسون است.  $U_1$  و  $U_2$  جابجایی لبه‌های ترک به موازات و عمود بر امتداد ترک بوده و علائم  $0^+$  و  $0^-$  به ترتیب لبه‌ی پایینی و لبه‌ی بالایی ترک را مشخص می‌نمایند.  $R_\Delta$  در نقاطی محاسبه می‌شود که به اندازه‌ی کافی به نوک ترک نزدیک بوده و در عین حال مقدار تقریباً ثابتی را نسبت به  $x$  داشته باشد. شایان ذکر است که مسئله با فرض کرنش صفحه‌ای بررسی شده است [۱۲]. با بررسی تأثیر هندسه‌ی شیار بر مقدار بحرانی انتگرال  $J$ ، نشان داده شده که با افزایش شعاع انتهایی شیار، این مقدار افزایش می‌یابد. عمق شیار، عرض نمونه و نیز تنوع بارگذاری (کششی یا خمشی) نیز تأثیر اندکی بر مقدار بحرانی انتگرال  $J$  داشته که قابل صرف‌نظر کردن است [۱۴].

### داده‌های تجربی

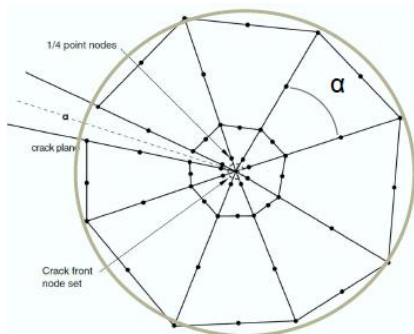
در شکل ۲، تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FE-SEM) از مقطع جانبی سه پوشش  $\text{TiN}$ ،  $\text{CrN}$  و  $\text{TiN/CrN}$  با بزرگ‌نمایی ۵۰۰۰۰ برابر، رسوب داده شده روی زیرلایه‌ی فولاد زنگ‌نزن ۴۲۰C نشان داده شده است. چسبندگی مناسبی بین پوشش و زیرلایه ایجاد شده است. ضخامت تمامی پوشش‌ها در حدود  $1/5 \mu\text{m}$  است، اما ضخامت لایه‌های میانی در نمونه‌ها متفاوت می‌باشد.



شکل ۲: تصاویر FE-SEM مقاطع جانبی (الف)  $\text{TiN}$ ، (ب)  $\text{CrN}$  و (ج)  $\text{TiN/CrN}$

<sup>۱</sup> Submodeling

در اطراف نوک ترک مدل می‌شود. بردار  $q$  نشان‌دهنده‌ی راستای گسترش ترک و بردار  $n$  عمود بر سطح ترک است [۱۵].



شکل ۷: المان فروریخته‌ی نهایی اطراف نوک ترک [۱۵]

### تفسیر و تحلیل نتایج

برای بررسی و مطالعه‌ی شکست در قطعات پوشش‌دهی شده دو روش براساس تنش و بررسی شکست براساس مکانیک شکست وجود دارد. در روش اول، مفاهیم براساس تنش می‌باشد که توصیفی واقعی از تنش و کرنش و اطلاعاتی درباره دلایل فیزیکی شکست مواد را ارائه می‌کند. به‌منظور توضیح رفتار مکانیکی پوشش‌ها و گسترش روش‌های پیش‌بینی شکست، پیش‌بینی رفتار تنش‌های اعمالی در این قطعات مفید است. تنش‌های پوست‌کنی اسمی و تنش برشی اسمی به مود اول و مود دوم تغییر شکل لایه‌های پوشش مربوط می‌باشد.

در روش دوم، مکانیک شکست اثرات شکاف را در حضور ترک بحث می‌کند. ثابت شده که این روش یک ابزار همیشگی برای آنالیز پوشش‌ها است. شکست در قطعات پوشش‌دهی شده اساساً به دو نوع می‌باشد: ۱. شکست بین لایه‌های پوشش‌های مختلف و ۲. شکست داخل هر یک از پوشش‌ها. (شکل ۸)



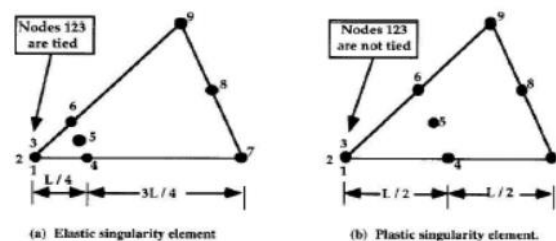
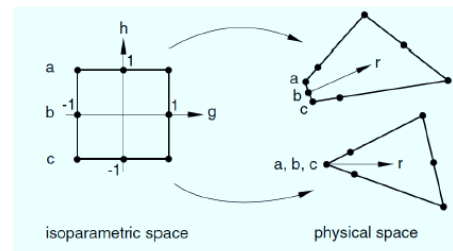
شکل ۸: شماتیک شکست‌های درون لایه و بین لایه‌ای

### توزیع تنش برشی و پوست‌کنی

ارزیابی تنش‌های برشی و پوست‌کنی برای هر سه نمونه انجام شد. بدین منظور برای بررسی دقیق‌تر تنش‌های برشی و پوست‌کنی، مسیرهای مختلفی در نمونه‌ها ایجاد گردید تا بتوان مقایسه‌ی دقیق‌تری بین مسیرهای مختلف انجام داد و همچنین نواحی بحرانی تنشی در هر نمونه را مشخص و بتوان این نواحی را در سایر نمونه‌ها با یکدیگر

### نحوه‌ی المان‌بندی

برای مدل‌سازی زیرلایه، از روش اجزای محدود با استفاده از المان‌های چهار گره‌ای سالیید<sup>۱</sup> دو بعدی کرنش صفحه‌ای استفاده شد. المان‌های لایه‌ها و ناحیه‌ی تماس آن‌ها با یکدیگر به‌منظور محاسبه‌ی تنش در ناحیه‌ی تماس المان در قسمت زیرلایه المان چهار گره‌ای کوهِسیو تعریف گردید. مقدار تنش در اطراف نوک ترک متناسب با  $\frac{1}{\sqrt{r}}$  می‌باشد که در آن  $r$  فاصله شعاعی از نوک ترک است. با میل کردن  $r$  به صفر، یعنی نزدیک شدن به نوک ترک، مقدار تنش به بی‌نهایت میل می‌کند. به این پدیده تکنیکی در نوک ترک گفته می‌شود. المان‌های عادی استفاده شده در نرم‌افزار، از ویژگی‌های لازم برای انجام چنین محاسباتی در اطراف نوک ترک برخوردار نیستند. زیرا در اطراف ترک المان‌های مثلثی بهتر مدل را پوشش می‌دهند. باید در اولین رینگ اطراف نوک ترک، از المان‌های سه ضلعی شش گرهی و در رینگ‌های بعدی، از المان‌های مربعی هشت گرهی استفاده کرد. اما با توجه به استفاده از روش انتگرال<sup>۲</sup>، نمی‌توان از دو نوع المان استفاده نمود. برای رفع این مشکل از نوع المان فروریخته استفاده می‌شود. برای مدل‌سازی دقیق ترک از المان‌های درجه دو استفاده شد. در این حالت مطابق شکل ۶، برای دوری از تکنیکی و افزایش دقت مشابه شکل ۷، در ناحیه‌ی نوک ترک، سه گره‌ی A و B و C در یک مختصات قرار می‌گیرند. به این المان، المان فروریخته‌ی آطلاق می‌شود. ترکیب این دو تنظیم برای مدل کردن ترک در حالت مکانیک شکست الاستیک صورت می‌گیرد.



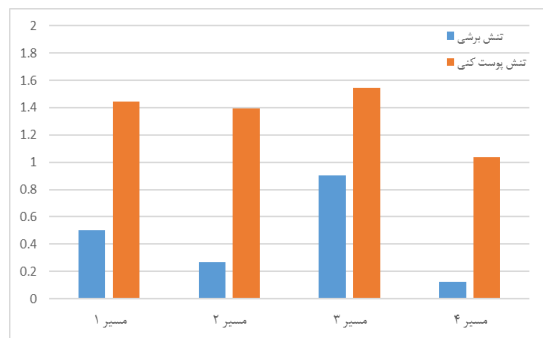
شکل ۶: المان فروریخته [۱۵]

در این حالت معیار تکنیکی،  $\frac{1}{\sqrt{r}}$  می‌باشد و گره‌های مرتبه‌ی دوم در فاصله  $0.25$  از نوک ترک مشابه شکل ۷ قرار داده خواهد شد، در حالی که در حالت عادی گره‌ها در وسط ضلع المان مرتبه‌ی دو قرار دارند. با انتقال این گره‌ها از وسط ضلع المان به یک‌چهارم ضلع المان، تکنیکی

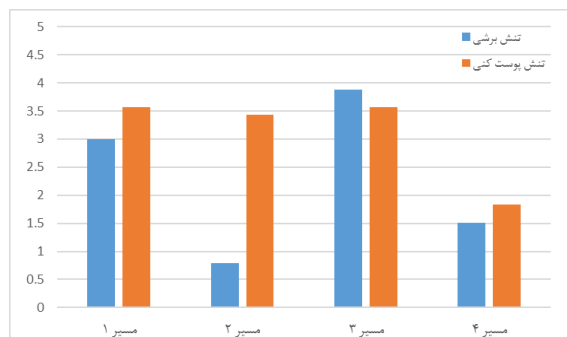
<sup>2</sup> Collapsed Element

<sup>1</sup> Solid

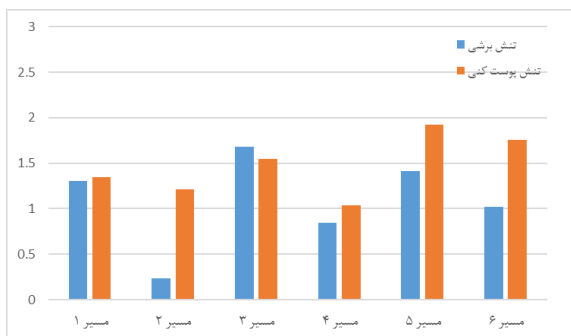
نمونه Steel/Ti/TiN نسبت به دو پوشش‌دهی دیگر مقاومت به شکست و گسیختگی بالاتری دارد.



شکل ۹: بیشینه تنش برشی و تنش پوست‌کنی نرمالایز شده در حالت دوبعدی کرنش صفحه‌ای در نمونه‌ی Steel/Ti/TiN



شکل ۱۰: بیشینه تنش برشی و تنش پوست‌کنی نرمالایز شده در حالت دوبعدی کرنش صفحه‌ای در نمونه‌ی Steel/Cr/CrN



شکل ۱۱: بیشینه تنش برشی و تنش پوست‌کنی نرمالایز شده در حالت دوبعدی کرنش صفحه‌ای در نمونه‌ی Steel/Ti/15[TiN/CrN]

### تعیین پارامترهای شکست

به دلیل نوع پوشش‌دهی و برای مقایسه‌ی بهتر ضرایب شدت تنش، ترک در نواحی مختلف ایجاد شد که به دو دسته‌ی کلی تقسیم می‌شوند: ترک‌های بین لایه‌ای در پوشش و ترک‌های درون لایه‌ای. شکل ۱۲، نمونه‌ی فولاد زنگ‌نزن ۴۲۰C، به همراه لایه‌ی پوشش داده شده بر روی آن را نشان می‌دهد. طول ترک برای ترک‌های داخل پوشش و ترک‌های بین دو لایه پوشش برابر با ۱۰ μm، و طول تمامی نمونه‌ها

مقایسه کرد. طبق انتظار در لایه‌های تماس لایه‌های پوشش، تمرکز تنش‌های برشی و پوست‌کنی مشاهده شد. این اثرات به صورت موضعی در نمونه‌ها دیده می‌شود و نشان‌دهنده‌ی این است که شروع گسیختگی در ابتدای ناحیه‌ی اتصال لایه‌ها با یکدیگر رخ می‌دهد. برای نمونه‌های Steel/Ti/TiN و Steel/Cr/CrN، با توجه به جدول ۲، چهار مسیر و برای نمونه‌ی Steel/Ti/15[TiN/CrN] شش مسیر، با توجه به اهمیت آنالیز تنش در لایه‌ها و مرزهای بین لایه‌ای در نظر گرفته شد؛

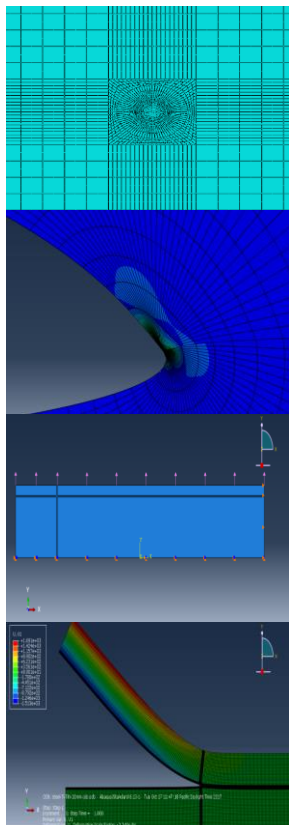
جدول ۲: الگوی تفکیک مسیرها به منظور بررسی تنش‌های برشی و پوست‌کنی

نمونه مسیر	Steel/Ti/TiN	Steel/Cr/CrN	Steel/Ti/15[TiN/CrN]
۱	مرز Steel/Ti	مرز Steel/Cr	مرز Steel/Ti
۲	داخل Ti	داخل Cr	داخل Ti
۳	مرز Ti/TiN	مرز Cr/CrN	مرز Ti/TiN
۴	داخل TiN	داخل CrN	داخل TiN
۵	-	-	مرز CrN/TiN
۶	-	-	داخل CrN

در ادامه ارزیابی تنش‌های برشی و پوست‌کنی به صورت نرمال شده نسبت به حداکثر مقاومت کششی نهایی مواد محاسبه شد. همان طور که بیان گردید، نزدیک نواحی ابتدایی و انتهایی، هم‌پوشانی چندلایه‌ها، تمرکز تنش‌های برشی و پوست‌کنی در محل لایه‌ها و هم‌چنین بین لایه‌های پوشش مشاهده می‌شود. این مطلب نشانگر وجود اثر تمرکز تنش در ضخامت است. این اثرات به صورت موضعی دیده می‌شوند و نشان‌دهنده‌ی این هستند که احتمالاً گسیختگی از نزدیکی این نقاط آغاز خواهد شد، هم‌چنین برخی گسیختگی‌های مربوط به آماده‌سازی نامناسب سطوح پوشش می‌باشند. علاوه بر این دلیل انتشار خرابی در پوشش‌ها، نزدیک ناحیه‌ی اتصال به چندلایه‌ها را می‌توان در برخی موارد به این موضوع مربوط دانست. ارزیابی تنش‌های برشی و پوست‌کنی به صورت نرمال شده برای نمونه‌ی Steel/Ti/TiN در شکل ۹ نشان داده شده و تنش‌ها در صفحات موردنظر به دست آمده است. با توجه به نتایج می‌توان گفت که احتمال گسیختگی برشی و پوست‌کنی بین لایه‌ی Ti و TiN نسبت به سایر مسیرها بیشتر است. شکل ۱۰، نشان‌دهنده‌ی حداکثر تنش‌های برشی و پوست‌کنی برای نمونه‌ی Steel/Cr/CrN است. دیده می‌شود که مقادیر ماکزیمم تنش برشی و پوست‌کنی نسبت به مسیرهای متناظر در نمونه‌ی Steel/Ti/TiN به مراتب بیشتر است. در این نمونه نیز بحرانی‌ترین مسیر در بین لایه‌ی Cr و CrN وجود داشته و این مسیر شانس گسیختگی بالاتری نسبت به سایر مسیرها دارا می‌باشد. در پوشش Ti/15[TiN/CrN] دو فاکتور نزدیک شدن به سطح و نواحی بین لایه‌ای در افزایش تنش‌ها مؤثر است. طبق شکل ۱۱، احتمال شکست در بین لایه‌ی CrN و TiN نسبت به سایر مسیرها بیشتر است. پس می‌توان گفت در روش بررسی شکست بر اساس تنش‌های بحرانی،

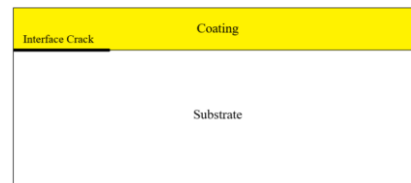


مقدار انتگرال  $J$  بالاتری نسبت به لایه‌ی  $Ti$  و مرز بین  $Ti$  و زیرلایه دارد. به‌همین ترتیب در نمونه‌ی  $Steel/Cr/CrN$  مرز بین  $Cr$  و  $CrN$ ، ناحیه‌ی مستعدتری برای انتشار ترک می‌باشد. این در حالی است که در نمونه‌ی  $Steel/15[TiN/CrN]$  نواحی بین لایه‌های  $TiN$  و  $CrN$  در معرض گسیختگی قرار می‌گیرند. دلیل اصلی این پدیده، بدین صورت است که افزایش ضخامت پوشش‌های سرامیکی، سبب کاهش تراکم کلی پوشش می‌گردد. این بدین معنا است که کاهش ضخامت قسمتی که مقاومت پایین‌تری در اتصال دارد، سبب می‌شود که قابلیت مقاومت در برابر رشد ترک کاهش پیدا کند. به عبارت دیگر این گرایش را می‌توان تحت تأثیر دو عامل در نظر گرفت. اولی بارگذاری خارجی که تأثیر قابل توجهی بر روی پوشش‌های سرامیکی داشته و در مواد شامل دو ماده مختلف، سبب تمایل به انتشار ترک می‌شود. این پدیده نه تنها بین دو ماده مختلف، بلکه در پوشش‌های با یک ماده نیز رخ می‌دهد. عامل دوم این رخداد این است که نزدیک شدن ترک به سطح قطعه موجب کاهش لایه‌ی فشرده‌شده می‌شود. لذا این کاهش ضخامت موجب تضعیف استحکام اتصال و کاهش مقاومت به رشد ترک می‌شود.



شکل ۷: مش‌ریزی و تحلیل المان محدود فولاد پوشش‌دهی شده با ترک لبه‌ای

برابر با  $60\mu m$  و عرض آن  $10\mu m$  در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از تحلیل اجزای محدود دوبعدی تمام نمونه‌ها به ازای ۱۰ کانتور تعیین گردید. کانتورهای ابتدایی به‌علت نزدیکی به نوک ترک و گرادیان تنش بالا، دارای خطا بوده و نتایج آن قابل قبول نیست. اما نتایج کانتور دوم تا دهم تقریباً برابر و قابل قبول‌اند، بنابراین بین نتایج کانتور سوم تا دهم، میانگین هر یک از خواسته‌های مقاله محاسبه شده است؛



شکل ۸: شماتیک نمونه‌ی فولادی پوشش‌دهی شده با ایجاد ترک لبه‌ای

هم‌چنین براساس شکل ۷، هنگامی که قطعه تحت بار کششی خارجی قرار می‌گیرد، پدیده‌ی ضریب تمرکز تنش به‌علت وجود ترک لبه‌ای قبل از بارگذاری، ظاهر می‌شود و زمانی که تنش وارد شده به میزان مشخصی می‌رسد، ترک تا گسیختگی نهایی قطعه انتشار می‌یابد. انتگرال  $J$  برای ترک‌های بین لایه‌ای و درون لایه‌ای می‌تواند به‌عنوان مقاومت اثر متقابل بین زیرلایه و پوشش سرامیکی و هم‌چنین لایه‌های مختلف پوششی به انتشار ترک در نظر گرفته شود. به عبارت دیگر، تکامل خرابی تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر چقرمگی شکست دو ماده‌ای دارد. به‌طوری که با افزایش بار کششی، رشد ترک ادامه خواهد یافت تا مقاومت پوشش سرامیکی از بین رود [۱۶]. در مباحث مکانیک شکست، وجود تأثیرات اتصالات کامپوزیتی سبب تمایل بیشتر به رشد ترک می‌گردد. در واقع نرخ انرژی آزاد شده به هر دولایه‌ی در تماس با یکدیگر مربوط است. با استفاده از ضرایب شدت تنش و انتگرال  $J$  می‌توان تأثیر مقاومت متقابل بین زیرلایه و پوشش و هم‌چنین در داخل هر یک از لایه‌ها را در برابر رشد ترک به‌دست آورد [۱۷]. هنگامی که ترک در پوشش‌های نانوساختار سرامیکی رشد می‌کند، ترک‌های داخلی درون لایه‌های پوشش تشکیل و سپس رشد می‌یابند. به‌همین دلیل مقدار بار خارجی، تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی پوشش‌های سرامیکی که مواد به نسبت تردتری نسبت به زیرلایه هستند، می‌گذارد و رشد ترک چشم‌گیری بر روی این مواد تحمیل می‌کند. این پدیده نه تنها در اتصال بین دو ماده، بلکه در داخل لایه‌های پوشش نیز رخ می‌دهد [۱۸]. شکل‌های ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ ضریب شدت تنش مؤثر و انتگرال  $J$  نمونه‌های پوشش‌دهی شده با ترک لبه‌ای به طول  $10\mu m$  با بار گسترده  $1N/\mu m$  آورده شده است. همان‌طور که در این شکل‌ها می‌توان دید، با نزدیک‌تر شدن ترک لبه‌ای به سطح پوشش، ضریب شدت تنش مؤثر و به دنبال آن انتگرال  $J$  نیز افزایش پیدا کرده است. طوری که در نمونه‌ی  $Steel/Ti/TiN$ ، بحرانی‌ترین ناحیه، مرز بین  $Ti$  و  $TiN$  است. چرا که

<sup>1</sup> Bi-material

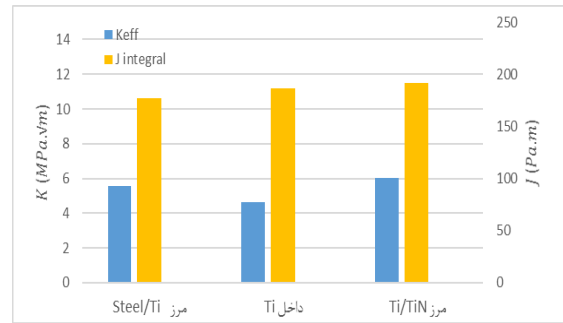
برای پوشش‌های سرامیکی می‌شود. به این ترتیب در هر سه نمونه، با توجه به این که مقادیر مدول الاستیسیته‌ی لایه‌های TiN و CrN بزرگتر از لایه‌های دیگر است، در نتیجه کرنش مقدار پایین‌تری خواهد داشت و کاهش مقدار انرژی کرنشی، منجر به دستیابی به مقادیر کوچک‌تر انتگرال J خواهد شد. اما همان‌طور که توضیح داده شد، فاکتور مؤثر دیگر، ضخامت لبه‌ی ترک تا سطح پوشش است که باعث پیچیدگی این رفتار شکست نمونه‌ها می‌گردد. بنابراین با مقایسه‌ی بحرانی‌ترین نواحی هر سه نوع پوشش با یکدیگر می‌توان دریافت که نمونه‌ی Steel/Ti/TiN نسبت به سایر نمونه‌ها، مقاومت بالاتری نسبت به انتشار ترک و شکست نهایی دارد. این در حالی است که در این بین، نمونه‌ی Steel/Cr/CrN کمترین مقاومت به شکست را داراست. در نتیجه می‌توان با توجه به تفسیر بالا چنین نتیجه‌گیری کرد که رابطه‌ی بین محل ایجاد ترک و مدول الاستیسیته، یک رابطه‌ی نسبی است. بنابراین با کاهش فاصله‌ی ترک از سطح، شاهد افزایش انتگرال J خواهیم بود. به دلیل ساختار سرامیکی پوشش، پدیده چین خوردن در پوشش سرامیکی اتفاق می‌افتد که می‌تواند سبب غیر یکنواختی (شل و محکم شدن) پوشش گردد. در نهایت می‌توان گفت، ضرایب شدت تنش و انتگرال J، در واقع چقرمگی شکست مواد را نشان می‌دهند که تحت تأثیر مدول الاستیسیته و مکان ایجاد ترک و ... مربوط به پوشش‌های سرامیکی در بارگذاری و شرایط مرزی یکسان و طول ترک لبه‌ای برابر قرار دارد.

### نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

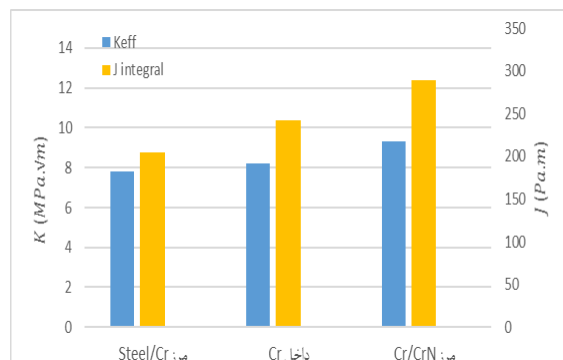
در این مقاله، با استفاده از نرم‌افزار آباکوس و بر مبنای روش اجزای محدود، مدل‌سازی و تحلیل دوبعدی رفتار شکست در نمونه‌های پوشش‌دار، با دو روش، یکی براساس تنش بحرانی و دیگری بررسی شکست براساس مکانیک شکست به انجام رسید. در روش اول که روش تنش بحرانی است، پوشش‌ها تحت بارگذاری‌های برشی و نرمال قرار گرفتند که نتایج حاصل شده براساس تنش برشی و تنش پوست‌کنی ارزیابی شد. در روش دوم، از پیش‌ترک لبه‌ای برای مقایسه‌ی ضریب شدت تنش مؤثر و انتگرال J استفاده گردید.

۱. نتایج به‌دست آمده از هر دو روش، نشان‌دهنده‌ی بهینه بودن پوشش Ti/TiN نسبت به پوشش‌های Ti/15[TiN/CrN] و Cr/CrN از نظر مکانیک شکست بود.

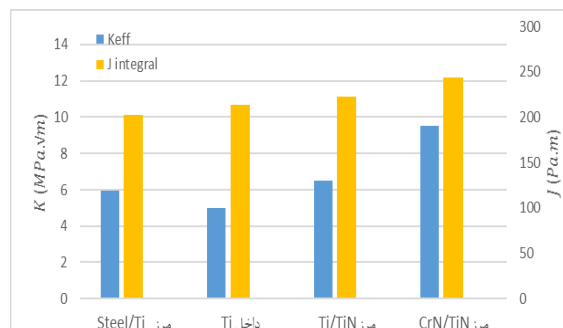
۲. بررسی نتایج، بیانگر تأثیر ضخامت لبه‌ی ترک تا سطح پوشش و مقادیر مدول الاستیسیته بر روی ضریب شدت تنش و در نتیجه انتگرال J بوده، طوری که بحرانی‌ترین نواحی در پوشش‌ها، مربوط به مناطق بین لایه‌های Ti و TiN، Cr و CrN و در نهایت TiN و CrN محاسبه شد.



شکل ۸: ضرایب شدت تنش مؤثر و انتگرال J نمونه‌ی Steel/Ti/TiN با ترک لبه‌ای



شکل ۹: ضرایب شدت تنش مؤثر و انتگرال J نمونه‌ی Steel/Cr/CrN با ترک لبه‌ای



شکل ۱۰: ضرایب شدت تنش مؤثر و انتگرال J نمونه‌ی Steel/15TiN/15CrN با ترک لبه‌ای

برای تفسیر بهتر پدیده انتگرال J، به‌طور خلاصه تئوری این پدیده بررسی می‌شود [۷]:

$$J = \left( \frac{\partial U}{\partial \alpha} \right)_P = \left( \frac{\partial \Pi}{\partial \alpha} \right) \quad (5)$$

انتگرال J به U،  $\Pi$  و  $\alpha$  که به ترتیب انرژی کرنشی به واحد ضخامت، انرژی پتانسیل به واحد ضخامت و طول ترک هستند، بستگی دارد. از آن‌جا که در تحقیق حاضر، طول ترک در تمامی ترک‌ها یکسان است. با توجه به رابطه‌ی ۵ هنگامی که مدول الاستیسیته‌ی لایه‌های پوشش پایین‌تر است، در بار کششی یکسان، مقدار کرنش بزرگ‌تر است. بدین ترتیب، مقدار بزرگ‌تر انرژی کرنشی منجر به مقادیر بزرگ‌تر انتگرال J

## مراجع

- specimen," *International Mining Congress*, Tehran, Iran, October 26-29, 2010.
- [10] M. R. Ayatollahi, M. H. Pourkavian and M. R. Mohammad Aliyah, "Determination of Minimum Pressure for the Start of Crack Growth in Hydraulic Failure Operations," *Scientific Journal of Mine Engineering*, Vol 6, No. 12, pp. 61-70, Autumn 2011.
- [11] S. Tanaka, H. Suzuki, S. Sadamoto, S. Sannomaru, T. Yu and T. Q. Bui, "J-integral evaluation for 2D mixed-mode crack problems employing a meshfree stabilized conforming nodal integration method," *Computational Mechanics*, Vol. 58, pp. 185-198, 2016.
- [13] A.O. Ozdemir and C. Karatas, "Experimental determination of fracture toughness of woven/chopped glass fiber hybrid reinforced thermoplastic composite laminates," *Scientia Iranica B*, Vol. 28, No. 4, pp. 2202-2212, 2021.
- [13] S. Nassim, M. Belaid, M. Rachid and S. Boualem, "A new formulation of the J integral of bonded composite repair in aircraft structures," *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 58, No. 5, pp. 745-755, 2016.
- [14] E. Barati and Y. Alizadeh, "Providing relationships for calculating fracture toughness in the groove to form under mode 1," *Twentieth Annual Iranian International Mechanical Engineering Conference*, Shiraz, Iran, May 26-28, 2012.
- [15] M. Goelke, *Intruduction to nonlinear Finite Element analyses using OptiStruct*, pp. 1-204, Altair University, Michigan, USA, 2018.
- [16] C. Diletto, A. D'Angelo, S. Esposito, A. Guglielmo, D. M. Gattia and M. Lanchi, "Materials Based on Amorphous  $Al_2O_3$  and Composite W- $Al_2O_3$  for Solar Coatings Deposited by High-Rate Sputter Processes," *Solar*, Vol. 3, pp. 113-131, 2023.
- [17] O. Kolednik, R. Schöngrundner and F. D. Fischer, "A new view on J-integrals in elastic-plastic materials," *International Journal of Fracture*, Vol. 187, pp. 77-107, 2014.
- [18] T. Tavsanoglu, M. Jeandin, O. Addemir and O. Yucel, "A functionally graded multilayer approach to the synthesis of boron containing ceramic thin films," *Solid State Sciences*, Vol. 14, pp. 1717-1721, 2012.
- [1] B. Henkel, T. Neubert, S. Zabel, C. Lamprecht, C. Selhuber-Unkel, K. Rätzke, T. Strunskus, M. Vergöhl and F. Faupel, "Photocatalytic properties of titania thin films prepared by sputtering versus evaporation and aging of induced oxygen vacancy defect," *Applied Catalysis B: Environmental*, Vol. 180, pp. 362-371, 2016.
- [2] B. Navinšek, P. Panjan and A. Cvelbar, "Characterization of low temperature CrN and TiN (PVD) hard coatings," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 74-75, pp. 155-161, 1995.
- [3] L. Dobrzański, A. Śliwa and W. Kwaśny, "Employment of the finite element method for determining stresses in coatings obtained on high-speed steel with the PVD process," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 164-165, pp. 1192-1196, 2005.
- [4] M. A. Moqaddam, M. Bakhshianabafarani and Ali Shafiei, "Simulation of residual stresses in TiN and CrN thin film coatings using finite element metho," *National Conference on Innovations in Thin Film Processing and Their Characteristics*, Tehran, Iran, December 8, 2011.
- [5] M. R. Ayatollahi, R. Pakzad and M. R. Mohammad Aliyah, "Numerical Analysis of a New Laboratory Sample to Study the Fracture Behavior of mixed mode 1 and 2 in Stones and Concrete Materials," *Fourth National Congress of Civil Engineering*, Tehran, Iran, May 17-19, 2008.
- [6] S. Mansouri, H. M. Masirabad, M. Shariati and N. Ziari, "Evaluation of various laboratory methods for determination of tensile and shear stress fracture toughness," *Thirteenth Earth Science Forum*, Tehran, Iran, December 11-12, 2012.
- [7] G. Cheng, T. Huiyu, C. Dayong, X. Jinyong, T. Yan and H. Ranran, "J-integral for interface crack on micro-arc oxidation ceramic coating," *Seventh International Conference on Electronics and Information Engineering*, *International Society for Optics and Photonics*, Vol. 10322, pp. 6, 2017.
- [8] Y. Burkay, *Effects of specimen height and loading span on the fracture toughness of disc type rock specimens under three point bending*, in thesis submitted to the graduate school of natural, 2008.
- [9] M. R. Ayatollahi and H. Saghafi, "Determination of fracture toughness of a marble rock using a modified laboratory