



Available in:  
Journal.isrc.ac.ir

Journal of  
Space Science, Technology  
& Applications (Persian)

Vol. 4, No. 1, pp.: 10-23  
2024

DOI:  
10.22034/jssta.2023.391116.1117

### Article Info

Received: 2023-04-04

Accepted: 2023-07-26

### Keywords

Electronic Board, Solder joints, Random vibration, Fracture, Interfacial crack.

### How to Cite this article

Z. Khaji, M. Fakoor, S. Shakheshi, " Investigating the fracture of electronic boards in space systems under random vibrations", *Journal of Space Science, Technology and Applications*, vol 4 (1), p.:10-23, 2024.

## Investigating the fracture of electronic boards in space systems under random vibrations

Zahra Khaji<sup>1</sup>, Mahdi Fakoor<sup>1\*</sup>, Saeed Shakhesi<sup>2</sup>

1. Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran

2. Iranian Space Research Center, Tehran, Iran

\* Corresponding Author

### Abstract

The design of space operations must be done carefully, Because the smallest mistake in the design and construction of the spacecraft causes heavy financial losses. Electronic boards, as one of the most important components of electronic systems in any operation, must be designed and built in such a way that they can continue to function under the incoming loads. The strong levels of random vibrations that space equipment is exposed to can cause damage and fracture in electronic boards. The random vibration field applied to the electronic board can be modeled by mixed-mode I/II loading. Fracture of electronic packages often occur due to cracking in the joint between the electronic board and the solder under mixed-mode I/II loading. In this research, a new fracture criterion based on the maximum tangential stress is presented to predict the fracture for the interfacial crack between the electronic board and the solder. Based on the presented criterion, the direction and moment of crack initiation are predicted for the interfacial crack between isotropic and orthotropic materials. In this way, the fracture limit curve can be drawn. By comparing the presented criterion with the available experimental data in references, it can be concluded that the presented criterion has sufficient validity to evaluate the prediction of fracture in interfacial cracks between isotropic and orthotropic materials.



دسترس پذیر در نشانی:  
Journal.isre.ac.ir

دو فصلنامه  
علوم، فناوری و  
کاربردهای فضایی

سال چهارم، شماره ۱، صفحه ۲۳-۱۰  
بهار و تابستان ۱۴۰۳

DOI:  
10.22034/jस्ता.2023.391116.1117

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۱۵

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۰۴

واژه‌های کلیدی

ارتعاشات تصادفی، شکست، ترک  
سطحی.

نحوه استناد به این مقاله

زهرآ خاجی، مهدی فکور، سعید  
شاخصی، " بررسی شکست بوردهای  
الکترونیک در سامانه‌های فضایی تحت  
ارتعاشات تصادفی"، دو فصلنامه علوم،  
فناوری و کاربردهای فضایی، جلد  
چهارم، شماره اول، صفحات ۲۳-۱۰،  
۱۴۰۳.

مقاله پژوهشی

## بررسی شکست بوردهای الکترونیک در سامانه‌های فضایی تحت ارتعاشات تصادفی

زهرآ خاجی<sup>۱</sup>، مهدی فکور<sup>۲\*</sup>، سعید شاخصی<sup>۳</sup>

۱- دکترا گروه مهندسی هوافضا، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- استاد، گروه مهندسی هوافضا، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳- دانشیار، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران

\* نویسنده مسئول

### چکیده

طراحی سازه‌های فضایی باید با دقت انجام شود، زیرا کوچک‌ترین اهمال در طراحی و ساخت فضاپیما، باعث خسارت‌های مالی سنگینی می‌شود. بوردهای الکترونیکی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین اجزای سیستم‌های الکترونیکی در هر عملیات، باید به‌گونه‌ای طراحی و ساخته شوند که تحت بارهای وارده بتوانند هم‌چنان به عملکرد خود ادامه دهند. سطوح قوی ارتعاشات تصادفی که تجهیزات فضایی در معرض آن قرار می‌گیرند، می‌تواند سبب خسارت در بوردهای الکترونیکی و شکست شود. میدان ارتعاشات تصادفی که بر روی برد الکترونیک اعمال می‌شود را می‌توان با بارگذاری مود ترکیبی I/II مدل کرد. واماندگی و شکست جعبه‌های الکترونیکی اغلب به علت ترک خوردگی در اتصال بین برد الکترونیکی و لحیم تحت بارگذاری مود ترکیبی I/II رخ می‌دهد. در این تحقیق، معیار شکست جدیدی بر مبنای حداکثر تنش مماسی برای پیش‌بینی شکست در ترک سطحی بین برد الکترونیکی و لحیم ارائه می‌شود. بر مبنای این معیار، جهت و لحظه شروع رشد ترک برای ترک سطحی بین دو ماده ایزوتروپیک و اورتوتروپیک پیش‌بینی می‌شود. به این ترتیب، منحنی حد شکست را می‌توان ترسیم کرد. با مقایسه معیار ارائه شده با داده‌های تجربی موجود در مراجع می‌توان دریافت که معیار ارائه شده اعتبار کافی برای ارزیابی پیش‌بینی شکست در ترک‌های سطحی بین دو ماده ایزوتروپیک و اورتوتروپیک را داراست.

## ۱- مقدمه

با توجه به هزینه‌های بالای طراحی و ساخت سامانه‌های فضایی، طراحی دقیق این سامانه‌ها بسیار مهم است. تجهیزات الکترونیک مورد استفاده در سیستم‌های کنترل، یکی از مهم‌ترین بخش‌های سیستم‌های الکترونیک هوانوردی مدرن هستند. جعبه‌های الکترونیکی، قلب تپنده سیستم‌های فضایی هستند. افزایش تحریم‌های همه‌جانبه به کشور، سبب می‌شود که دسترسی به جعبه‌های الکترونیکی به ویژه بوردهای الکترونیکی به راحتی امکان‌پذیر نباشد. به این ترتیب، تحلیل و بررسی دقیق بوردهای الکترونیکی تحت بارگذاری ارتعاشاتی به منظور جلوگیری از آسیب‌های پیش‌رونده و شکست آنها بسیار مهم است [۱-۳]. بوردهای الکترونیک باید به صورت دقیق تحلیل و شبیه‌سازی شوند تا از خسارت‌های بعدی بر روی آنها کاسته شود. باید توجه ویژه‌ای به اتصال بین بخش‌های مختلف جعبه الکترونیک داشت. این اتصالات به دلیل ارتعاشات شدید در معرض شکست قرار دارند [۴]. از سوی دیگر، قطعات الکترونیکی در هنگام پرتاب نیز در معرض خرابی هستند. بنابراین، تحقیقات زیادی روی استحکام بوردهای الکترونیکی انجام گرفته است. انواع بارهای استاتیکی و دینامیکی ممکن است در طی عملکرد ماهواره به آن اعمال شود. بارهای اعمال شده بر روی ماهواره عموماً به صورت بارهای تصادفی هستند که به صورت شبه استاتیکی در نظر گرفته می‌شوند [۵]. اتصالات لحیم<sup>۱</sup> مانند بوردهای الکترونیکی از اجزای بسیار حساس و حیاتی ماهواره‌ها هستند. بیش‌تر شکست‌ها در بوردهای الکترونیکی در بخش قطعات الکترونیکی<sup>۲</sup> و اتصالات لحیمی رخ می‌دهد [۶]. به علاوه، به دست آوردن تنش وارده به آنها برای طراحی مناسب بوردها، در مدت زمان کارکرد آنها اهمیت بسیار زیادی دارد. در طول پرتاب فضاپیما، ارتعاشات بسیار زیاد از طریق پرتاب‌گر به ساختار فضاپیما منتقل می‌شود؛ در جایی که شدت این ارتعاشات به اندازه کافی قوی باشد، باعث خسارت در بوردهای الکترونیکی و شکست می‌شود [۷].

حجم زیادی از تحقیقات به سمت توسعه مدل‌هایی برای پیش‌بینی شکستگی لحیم‌ها در مورد الکترونیکی هدایت شده است، زیرا بوردهای الکترونیکی از اجزای مهم و حیاتی سامانه‌های فضایی هستند [۸، ۹]. واماندگی و شکست جعبه‌های الکترونیکی اغلب به علت ترک خوردگی لحیم‌ها یا در اتصال بین مورد الکترونیکی و لحیم تحت بارگذاری مورد

ترکیبی I/II رخ می‌دهد [۱۰]. به علاوه، رشد ترک تحت تاثیر بارگذاری و خواص مکانیکی لحیم قرار دارد. به این ترتیب، توسعه روش‌هایی برای پیش‌بینی شکست اتصالات لحیم تحت بارهای مکانیکی شبه استاتیکی ضروری است. این بارهای مکانیکی ممکن است که به صورت مستقیم از طریق لحیم یا از طریق خمش مورد به آن وارد شود [۱۱].

درک کامل مکانیک شکست سطحی برای طراحی بهتر سازه‌های کامپوزیتی ضروری است [۱۲]. مطالعه رفتار شکست ترک خوردگی در امتداد فصل مشترک دو جسم برای تجزیه و تحلیل یکپارچگی ساختاری و طراحی مقاوم به آسیب ضروری است. ترک‌های سطحی، یکی از مرسوم‌ترین مودهای واماندگی مواد در محیط‌های دو ماده‌ای هستند [۱۳]. ترک‌های سطحی ممکن است بر روی سطح و یا در یکی از دو ماده بهم متصل بسته به مقاومت دو ماده و بارگذاری اعمال شده رشد کنند. ارزیابی مکانیک شکست یک ترک سطحی بین دو ماده غیرمشابه در ارزیابی یکپارچگی اتصالات در مواد کامپوزیتی بسیار مهم است. استحکام سطحی اجزای بهم متصل توسط ترک‌های سطحی به شدت تضعیف می‌شود. کاهش استحکام سطحی ممکن است منجر به شکست فاجعه بار شود [۱۴].

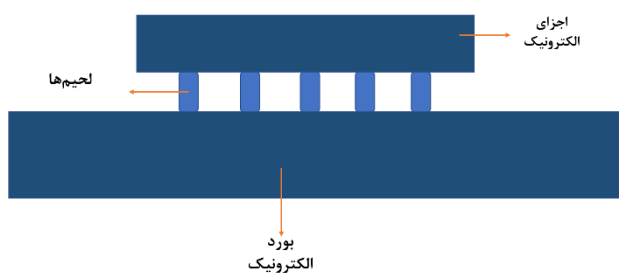
در تحلیل و بررسی مجموعه مورد الکترونیک و اتصالات لحیم نیز ترک بین دو ماده ایزوتروپیک (لحیم) و اورتوتروپیک (مورد الکترونیک) در نظر گرفته می‌شود. به منظور تحلیل دقیق رفتار شکست ترک سطحی بین مورد الکترونیک و لحیم، باید میدان تنش و ضرایب شدت تنش را برای این وضعیت به دست آورد. با هدف بررسی شکست سطحی معیارهای شکست مختلفی تا به امروز برای پیش‌بینی لحظه شروع رشد ترک و زاویه شروع رشد ترک برای هندسه‌های مختلف ارائه شده است. هم‌چنین، معیارهای شکست مختلفی برای بررسی رفتار شکست سطحی در مواد همگن بر مبنای انرژی [۱۵] و تنش [۱۶، ۱۷] به صورت گسترده‌ای توسعه یافته‌اند. در معیارهای مبتنی بر انرژی، معیار شکست حداکثر نرخ آزادسازی انرژی کرنشی به صورت گسترده‌ای توسط محققان برای پیش‌بینی رفتار شکست ترک‌های سطحی به کار برده شده است. بر مبنای این معیار، شکست زمانی رخ می‌دهد که نرخ آزادسازی انرژی کرنشی با نرخ آزادسازی انرژی کرنشی بحرانی برابر باشد. به صورت کلی، شکست اتصالات لحیم تحت بارگذاری مورد ترکیبی I/II رخ

<sup>2</sup> Integrated circuit<sup>1</sup> Solder joint

مواد ترد و نرم ارائه کردند. به علاوه، تاثیرات افزایش طول ترک را بر روی ضرایب شدت تنش مورد بررسی قرار دادند [۲۴]. بر اساس مطالعات انجام شده، تاکنون رفتار شکست بوردهای الکترونیکی با فرض ترک سطحی بین بورد الکترونیکی و اتصال لحیم تحت بارگذاری ارتعاشات تصادفی بر مبنای معیار شکست مناسبی بررسی نشده است. در این مقاله، برای نخستین بار معیار حداکثر تنش مماسی<sup>۱۱</sup> برای بررسی رفتار ترک سطحی بین بورد الکترونیکی (ماده اورتوتروپیک) و لحیم (ماده ایزوتروپیک) به منظور پیش‌بینی شرایط شروع شکست سطحی ارائه می‌شود. با هدف بررسی شکست ناشی از ارتعاشات تصادفی، این بارگذاری با بارگذاری مود ترکیبی I/II معادل می‌شود. ماده اورتوتروپیک نیز بر مبنای مفهوم جامد ایزوتروپیک تقویت شده مدل‌سازی می‌شود. منحنی حد شکست ترک سطحی بر مبنای معیار شکست ارائه شده ترسیم می‌شود و پس از مقایسه با نتایج تجربی موجود، اعتبار معیار ارائه شده مورد بررسی قرار گیرد.

## ۲- اتصالات لحیم بوردهای الکترونیکی

منظور از اتصالات لحیم، اتصالاتی است که رابط بین بورد الکترونیکی و قطعات الکترونیکی هستند و قطعات الکترونیکی را روی بورد الکترونیکی ثابت نگه می‌دارند (شکل ۱). این اتصالات انواع مختلفی دارند که از هر کدام با توجه به نیاز استفاده می‌شود [۲۵].



شکل (۱) - اتصال لحیم بین بورد الکترونیکی و قطعه الکترونیکی

این اتصالات در مقابل تنش بسیار حساس و شکننده هستند، از این‌رو، تلاش زیادی برای طراحی بهینه بوردهای الکترونیکی برای کم‌تر کردن تنش وارده بر این اتصالات انجام

می‌دهد و نرخ آزادسازی انرژی کرنشی ترکیبی از نرخ آزادسازی انرژی کرنشی مود I ( $G_I$ ) و مود II ( $G_{II}$ ) است. برخلاف مسائل ترک در ماده همگن، در ترک سطحی بین دو ماده‌ای، همواره مود برش (مود II) و بازشدگی (مود I) نوک ترک ایجاد می‌شود و نوک ترک رفتار تکینگی نوسانی<sup>۱</sup> دارد. رایس<sup>۲</sup>، حل میدان تنش و کرنش اطراف نوک یک ترک سطحی را بین دو ماده غیرمشابه ایزوتروپیک بر مبنای سری ویلیامز<sup>۳</sup> توسعه داد [۱۸]. او میدان‌های تنش و کرنش را بر حسب انتگرال J و سخت شوندگی ماده استخراج کرد. هاجینسون<sup>۴</sup> و سو<sup>۵</sup> به بررسی ضرایب شدت تنش در وضعیت شکست مود ترکیبی I/II در یک ترک سطحی بین دو ماده ایزوتروپیک پرداختند [۱۹]. چارالامبیدز<sup>۶</sup> و همکاران پاسخ تحلیلی برای اندازه‌گیری نرخ آزادسازی انرژی کرنشی در ترک‌های سطحی در قطعات تست متقارن ارائه کردند [۲۰].

در بررسی میدان تنش بین دو ماده اورتوتروپیک غیرمشابه نیز تحقیقات گسترده‌ای انجام شده است. کیان<sup>۷</sup> و سان<sup>۸</sup>، ضرایب شدت تنش برای ترک‌های سطحی بین دو ماده اورتوتروپیک غیرمشابه را با استفاده از حل صریح میدان تنش و جابه‌جایی اطراف نوک ترک استخراج کردند. آن‌ها نرخ آزادسازی انرژی کرنشی مود I ( $G_I$ ) و مود II ( $G_{II}$ ) را ارائه کردند و به این ترتیب معیار شکست جدیدی حداکثر نرخ آزادسازی انرژی کرنشی تحت بارگذاری مود ترکیبی I/II برای پیش‌بینی شکست سطحی بین دو ماده اورتوتروپیک توسعه یافت [۲۱]. سان و منوهاران<sup>۹</sup> نشان دادند که مولفه‌های نرخ آزادسازی انرژی کرنشی در مود I و II برای ترک سطحی بین دو ماده اورتوتروپیک غیرمشابه به علت وجود ترم‌های نوسانی به درستی تعریف نشده است [۲۲]. آن‌ها به صورت تحلیلی و عددی به بررسی نرخ آزادسازی انرژی کرنشی در مود I و II پرداختند.

غفاریان به بررسی تجربی شکست بوردهای الکترونیکی با اتصال لحیم در دماهای مختلف پرداخت. او انتشار و تخریب ترک را در سیکل‌های مختلف دمایی مورد تحلیل و بررسی قرار داد [۲۳]. کارس<sup>۱۰</sup> و همکاران یک روش تجربی برای مطالعه شروع و انتشار ترک در اتصالات لحیم کاری طی فرایند خستگی در

<sup>7</sup> Qian

<sup>8</sup> Sunj

<sup>9</sup> Sun and Manoharan

<sup>10</sup> Caers

<sup>11</sup> Maximum Tangential Stress (MTS)

<sup>1</sup> Oscillatory singularity

<sup>2</sup> Rice

<sup>3</sup> Williams series

<sup>4</sup> Hutchinson

<sup>5</sup> Suo

<sup>6</sup> Charalambides

ارتعاشات تصادفی  $x(t)$ ، تابع چگالی احتمال بین دو زمان  $t_1$  و  $t_2$  طی یک فرایند تصادفی  $S_{xx}(\omega)$  با استفاده از تبدیل فوریه<sup>۲</sup> تابع همبستگی خودکار تعریف می‌شود که  $\tau = t_2 - t_1$  زمان جدایش<sup>۳</sup> است.

$$S_{xx}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} R_{xx}(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau; -\infty < \tau < +\infty \quad (1)$$

در رابطه بالا،  $\omega$  فرکانس زاویه‌ای است و  $i = \sqrt{-1}$  تعریف می‌شود. تابع  $S_{xx}(\omega)$ ، تابع چگالی طیفی توان در طی پروسه  $x(t)$  است. تابع چگالی طیفی توان تبدیل فوریه تابع  $R_{xx}(\tau)$  است. تابع همبستگی خودکار هر فرایند تصادفی  $x(t)$  به صورت زیر نوشته می‌شود [۲۶]:

$$R_{xx}(\tau) = E[x(t) \cdot x(t + \tau)] \quad (2)$$

$$= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t) \cdot x(t + \tau), -\infty < \tau < \infty$$

که  $E[0]$  مقدار مورد انتظار<sup>۴</sup> یک فرایند تصادفی است و مربوط به مقدار میانگین یک فرایند تصادفی  $x(t)$  می‌شود. شایان ذکر است که تابع همبستگی خودکار را می‌توان با استفاده از تابع معکوس چگالی توان احتمال بر مبنای تبدیل فوریه استخراج کرد.

$$R_{xx}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{xx}(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega; -\infty < \omega < +\infty \quad (3)$$

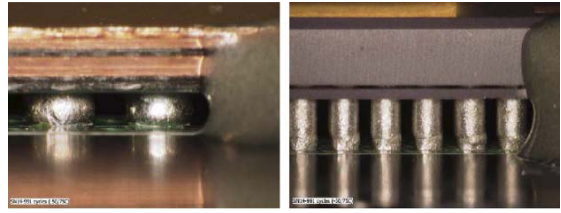
برای زمان جدایش صفر ( $\tau = 0$ ) تابع  $R_{xx}(\tau)$  به صورت زیر است:

$$R_{xx}(0) = E[x^2(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{xx}(\omega) d\omega, -\infty < \omega < \infty \quad (4)$$

برای  $\tau = t_2 - t_1$  می‌توان ثابت کرد که رابطه زیر برقرار است:

$$R_{xx}(\tau) = R_{xx}(t_1, t_2) = E[x_1(t) x_2(t)] \quad (5)$$

می‌شود. شکل (۲)، اتصال لحیم بین قطعه و برد الکترونیکی را نشان می‌دهد.



شکل (۲) - اتصالات لحیمی در برد الکترونیکی [۲۳]

عوامل فیزیکی، خمش زیاد برد، شتاب زیاد و جابه‌جایی‌های بزرگ که باعث ضربه می‌شوند، چهار عامل مهم شکست اتصالات لحیمی در بوردهای الکترونیکی هستند.

### ۳- پیش زمینه تئوری

در این بخش، به بررسی ارتعاشات تصادفی پرداخته می‌شود. ارتعاشات تصادفی به ارتعاشاتی گفته می‌شود که دامنه آن ارتعاشات متغیر است و فرکانس‌های بی‌شماری را شامل می‌شود. وقتی گفته می‌شود که دامنه فرکانسی ارتعاش تصادفی بین دو فرکانس مشخص است، یعنی همه فرکانس‌ها بین این دو فرکانس هم‌زمان در ارتعاشات حضور دارند. بنابراین، فرکانس طبیعی سیستم به راحتی می‌تواند تحریک شود. از این‌رو، حل مسائل ارتعاشات تصادفی با حل ارتعاشات هارمونیک متفاوت است و اغلب به صورت آماری بررسی می‌شود. در مسائل مهندسی معمولاً با استفاده از روابطی، این نوع بارگذاری با بارگذاری شبه استاتیکی جایگزین می‌شود.

سیستم زمانی تحت تحریک پایه تصادفی قرار می‌گیرد که مقدار آنی در یک باند فرکانسی باریک دلخواه، یک تابع چگالی احتمال نرمال یا گوسی داشته باشد. این تحریک منجر به صورت چگالی طیفی توان<sup>۱</sup> بیان شود. چگالی طیفی توان ثابت را نویز سفید نیز می‌گویند. چگالی طیفی توان نویز سفید می‌تواند به صورت جابه‌جایی، سرعت و شتاب بیان کرد.

در یک سیستم ارتعاشات تصادفی، حرکت قابل پیش‌بینی است. در ارتعاشات تصادفی سرعت و حرکت سیستم به تحریک اعمال شده، جرم و سفتی آن وابسته است. برای یک پروسه

<sup>3</sup> The separation time

<sup>4</sup> The statistical expectation

<sup>1</sup> Power spectral density (PSD) function

<sup>2</sup> Fourier transform

#### ۴- رابطه مایلز<sup>۱</sup>

فرایند نویز سفید دو طرفه  $\ddot{U}(t)$  با ثابت چگالی طیفی توان  $W_{\ddot{U}}/2$  در بازه  $-\infty < \omega < \infty$  تعریف می‌شود. بر مبنای روابط مایلز، مقادیر میانگین مربع شتاب مطلق  $\ddot{X}$  را به صورت زیر می‌توان به دست آورد:

$$E\{\ddot{X}^2\} = \frac{\pi\omega_n W_{\ddot{U}} Q}{2} (1 + 4\zeta^2) \quad (۸)$$

حال در صورتی که دمپینگ مودال کمتر از 5% در نظر گرفته شود، مربع میانگین شتاب مطلق  $\ddot{X}$  را به صورت زیر می‌توان تخمین زد:

$$E\{\ddot{X}^2\} = \frac{\pi\omega_n W_{\ddot{U}} Q}{2} (1 + 4\zeta^2) = \frac{\pi\omega_n W_{\ddot{U}} Q}{2} \quad (۹)$$

به علاوه، رابطه بین جابه‌جایی و شتاب نیز به صورت زیر است:

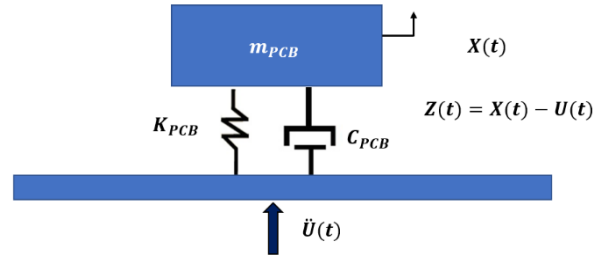
$$E\{\ddot{X}^2\} = \omega_n^4 E\{X^2\} \quad (۱۰)$$

در برخی موارد فرکانس طبیعی  $f_n$  (Hz) به صورت  $f_n = \frac{\omega_n}{2\pi}$  بیان می‌شود. به این ترتیب، رابطه زیر برای انحراف معیار جابه‌جایی بیان می‌شود [۲۷]:

$$X_{rms} = \sqrt{\frac{W_{\ddot{U}} Q}{16\pi^3 f_n^3}} \quad (۱۱)$$

مزیت معادله مایلز این است که در طول طراحی سازه، اگر تحلیل مودال برای ارزیابی فرکانس تشدید سازه انجام شده باشد، می‌توان از معادله مایلز برای ارزیابی بارهای ناشی از ارتعاشات تصادفی استفاده کرد. مزیت دیگر این است که با آزمایش چند درجه آزادی، شتاب‌های ناشی از ارتعاشات تصادفی در فرکانس تشدید را می‌توان با استفاده از معادله مایلز به دقت ارزیابی کرد. این روش برای سیستم‌های یک درجه آزادی قابل استفاده است. در این روش بار تصادفی فقط با شتاب و جابه‌جایی شبه استاتیکی برای سیستم یک درجه آزادی جایگزین می‌شود [۲۸، ۲۹].

در کاربردهای مهندسی، با توجه به پیچیدگی‌های حل بارگذاری تصادفی، از روش‌هایی برای جایگزینی بارگذاری تصادفی با بارگذاری شبه استاتیکی استفاده می‌شود. یکی از این روش‌های بسیار رایج، روش مایلز است [۲۷]. مایلز در سال ۱۹۵۴ برای تخمین شکست ناشی از خستگی قسمت‌های سازه‌ای هواپیما تحت اثر ارتعاشات موتور جت، مدلی را برای به دست آوردن ریشه میانگین مربعات شتاب و جابه‌جایی ارائه کرد. مدل مایلز برای سیستم یک درجه آزادی شامل یک جرم، فنر و دمپر کاربرد دارد. در مدل مایلز طبق شکل (۳)، جرم، فنر و دمپر تحت بارگذاری تصادفی قرار گرفته‌اند. معادله حرکت سیستم یک درجه آزادی مورد الکترونیکی براساس شکل (۳) به صورت معادله زیر است:



شکل (۳) - مدل یک درجه آزادی مورد الکترونیکی

$$m\ddot{Z}(t) + c\dot{Z}(t) + kZ(t) = -m\ddot{U}(t) \quad (۶)$$

که در اینجا  $m$ ،  $c$  و  $k$  به ترتیب جرم و میرایی و سفتی مورد الکترونیکی هستند.  $\ddot{U}(t)$  شتاب اجباری تصادفی است.  $X(t)$  و  $Z(t)$  به ترتیب جابه‌جایی نسبی و مطلق مورد الکترونیکی است. به علاوه، شتاب مطلق مورد الکترونیکی از طریق رابطه زیر به دست می‌آید [۲۷]:

$$\ddot{X} = -2\zeta\omega_n\dot{Z} - \omega_n^2 Z \quad (۷)$$

که در اینجا نسبت دمپینگ  $\zeta = \frac{c}{c_c} = \frac{c}{2\sqrt{k/m}}$  است. فاکتور تقویت نیز  $Q = \frac{1}{2\zeta}$  است. به علاوه، فرکانس طبیعی سیستم نیز به صورت  $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$  است. شتاب اجباری تصادفی به صورت

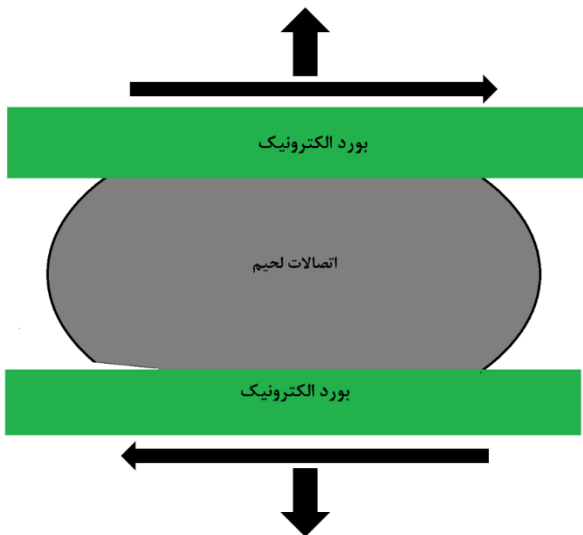
<sup>2</sup> Double-sided white noise process

<sup>1</sup> Miles equation

## ۵- معادل سازی بارگذاری ارتعاشات تصادفی با بارگذاری

### مود ترکیبی I/II

همان طور که بیان شد، برد الکترونیک تحت بارگذاری ارتعاشات تصادفی قرار دارد و بر مبنای روابط مایلز بارگذاری ارتعاشات تصادفی با بار شبه استاتیکی معادل می‌شود. هدف ما در این بخش، بررسی شکست ناشی از بارگذاری ارتعاشات تصادفی است. هر نوع بارگذاری به برد الکترونیک اعمال شود، از نقطه نظر مکانیک شکست باعث باز شدن دهانه ترک (مود I) و ایجاد برش در سطوح ترک (مود II) می‌شود. به این ترتیب، به منظور بررسی شکست برد الکترونیک تحت بارگذاری ارتعاشات تصادفی، این بارگذاری با بارگذاری مود ترکیبی I/II معادل می‌شود. شکل (۴)، نمایی از اعمال بارگذاری ارتعاشات تصادفی بر روی برد الکترونیک و معادل سازی این بارگذاری با بار شبه استاتیکی زاویه دار را در حالت کلی نشان می‌دهد.

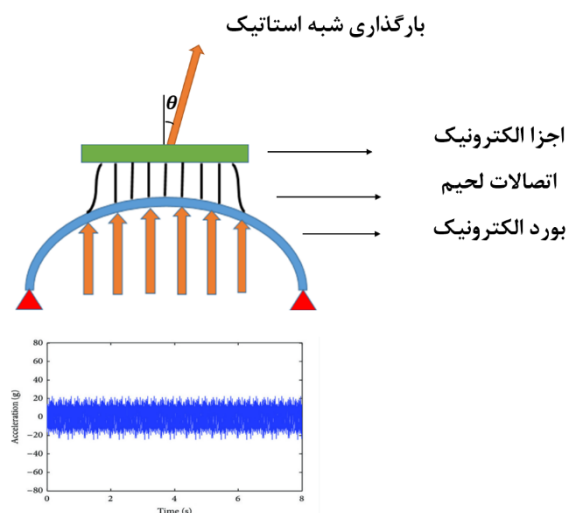


شکل (۵) - ترک سطحی بین برد الکترونیک و اتصال لحیم تحت بارگذاری مود ترکیبی I/II

## ۶- مدل سازی برد الکترونیک کامپوزیتی بر مبنای

### مفهوم جامد ایزوتروپیک تقویت شده

مشاهدات تجربی مختلف حاکی از آن است که ترک‌ها در مواد مقید شده توسط استحکام بخش‌ها مطابق شکل (۶) در هر جهت بارگذاری دلخواه نسبت به تقویت کننده‌ها همواره می‌چرخند<sup>۱</sup> و در راستای استحکام بخش‌ها منتشر می‌شوند. علت اصلی انتشار ترک در راستای الیاف، مربوط به ضعیف بودن ماتریس نسبت به الیاف است [۳۰]. در مدل جامد ایزوتروپیک تقویت شده، ماده مقید شده به صورت یک ماده ایزوتروپیک با تقویت کننده الیاف فرض می‌شود. فلسفه اصلی این مدل این است که شکست در مواد اورتوتروپیک همواره در بستر ماده ایزوتروپیک رخ می‌دهد. در این مدل، الیاف تنها به عنوان یک عنصر تقویت کننده عمل می‌کند و هیچ نقشی در جلوگیری از انتشار ترک ایفا نمی‌کند. به این ترتیب، نقش الیاف کاهش میدان تنش در اطراف نوک ترک است. کاهش میدان تنش الیاف با استفاده از ضریب کاهش توزیع تنش در اطراف نوک ترک تعریف می‌شود. مفهوم جامد ایزوتروپیک تقویت شده با استفاده از روابط زیر نشان داده می‌شود [۳۱]:



شکل (۴) - نمایی از جعبه الکترونیکی تحت بارگذاری ارتعاشات تصادفی و معادل سازی این بارگذاری با بار شبه استاتیکی در حالت کلی

به این ترتیب، در بررسی شکست برد الکترونیک در وضعیت ترک سطحی بین برد الکترونیک و اتصال لحیم، ترک تحت بارگذاری مود ترکیبی I/II قرار دارد. همچنین، برد الکترونیکی به صورت یک ماده اورتوتروپیک و اتصالات لحیم به صورت ماده ایزوتروپیک فرض می‌شوند. شکل (۵)، نمایی از ترک بین اتصال لحیم و برد الکترونیک را تحت بارگذاری مود ترکیبی I/II نشان می‌دهد.

<sup>۱</sup>Kink

دو وضعیت دیگر، ضرایب تقویت کننده براساس باری که در بخش الیاف و ماتریس تحمل می‌شود، به صورت زیر استخراج می‌شوند [۳۲]:

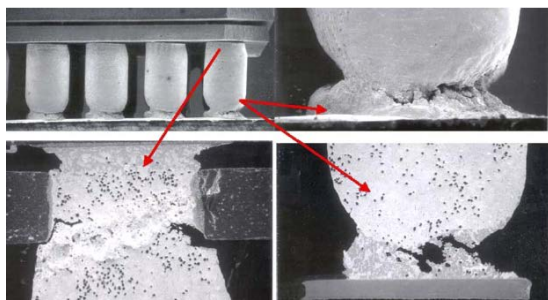
$$\alpha_1 = \frac{E_{11}}{E_{22}} \quad (13)$$

$$\alpha_3 = (1 - V_f) \left( 1 + \frac{E_{11}(1 + \nu_{21})}{E_{22}(1 + \nu_{12})} \right) \quad (14)$$

که در اینجا  $V_f$  کسر حجمی الیاف در مورد الکترونیکی است.

#### ۷- معیار شکست بیشترین تنش مماسی

اکثر مواقع شکست اتصال لحیم در نزدیکی مورد الکترونیکی رخ می‌دهد. البته شکست‌هایی نیز در نزدیکی قطعه الکترونیکی رخ می‌دهد. شکست در قطعات لحیم توسط محققین در تست‌های آزمایشگاهی مشاهده شده است [۳۳]. شکست‌هایی که در اتصالات لحیمی رخ می‌دهند در اکثر مواقع از لبه‌های بیرونی شروع می‌شوند. به علاوه، لحیم‌ها از جنس مواد ایزوتروپیک هستند. در شکل‌های (۷) و (۸) تصاویری از رشد ترک در اتصالات لحیم نشان داده شده است.

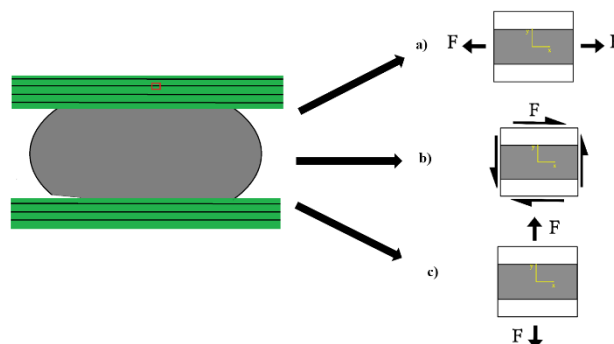


شکل (۷) - نمونه ای از اتصال ترک خورده در تست آزمایشگاهی غفاریان<sup>۲</sup> در نزدیکی مورد الکترونیکی [۳۳]

$$\sigma_{xx}^{orth} = \frac{\sigma_{xx}^{Iso}}{\alpha_1}, \sigma_{yy}^{orth} = \frac{\sigma_{yy}^{Iso}}{\alpha_2}, \sigma_{xy}^{orth} = \frac{\sigma_{xy}^{Iso}}{\alpha_3} \quad (12)$$

در این روابط،  $\sigma_{ij}^{orth}$  میدان تنش اطراف نوک ترک در یک ماده اورتوتروپیک است که بر مبنای مفهوم جامد ایزوتروپیک تقویت شده مدل شده است.  $\sigma_{ij}^{Iso}$  نیز میدان تنش ایزوتروپیک اطراف نوک ترک است. ضرایب  $\alpha_i$  هم ضرایب تقویت کننده در مدل جامد ایزوتروپیک تقویت شده هستند. در مفهوم جامد ایزوتروپیک تقویت شده، دقیق‌ترین و کوچک‌ترین قسمت ماده که نمایانگر کل خواص ماده است، مورد بررسی قرار می‌گیرد. این بخش کوچک به عنوان عنصر حجمی نماینده<sup>۱</sup> تعریف می‌شود که شامل تمام خواص کشسانی و استحکامی مواد اورتوتروپیک است. المان حجمی نماینده در شکل (۶) نشان داده شده است.

فکور و منافی ضرایب استحکام بخش را با رویکرد المان محدود استخراج کردند [۳۲]. آن‌ها المان شکل (۶) را به عنوان المان حجمی نماینده در نظر گرفتند. به علاوه، باری که الیاف و ماتریس به صورت جداگانه در ماده اورتوتروپیک تحمل می‌کنند را محاسبه کردند. شکل (۶) سه بار مستقل داخل صفحه را در یک المان حجمی نماینده نمایش می‌دهد.

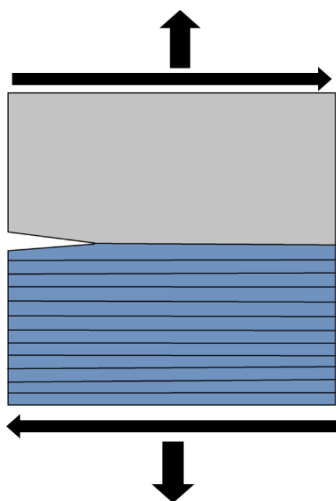


شکل (۶) - المان حجمی نماینده مورد الکترونیکی تحت بارگذاری (a) کششی در راستای الیاف (b) برشی (c) کششی عمود بر الیاف

در شکل c، المان حجمی نماینده تحت بار کششی در راستای عمود بر الیاف قرار دارد. در این وضعیت الیاف نقشی در کاهش تنش بر روی ماتریس ندارد. به این ترتیب،  $\alpha_2 = 1$  است. در

<sup>2</sup> Ghaffarian

<sup>1</sup> Representative volume element (RVE)



شکل (۹) - نمایی از ترک سطحی بین ماده ایزوتروپیک و اورتوتروپیک تحت بارگذاری مود ترکیبی I/II

طول ترک  $l$  است. بارگذاری به صورت ترکیب بارگذاری برشی و کششی در نظر گرفته شده است. در این بخش، در ابتدا میدان تنش اطراف نوک ترک سطحی ماده ایزوتروپیک تحت بارگذاری مود ترکیبی I/II به صورت زیر ارائه می‌شود [۱۶]:

$$\sigma_{xx}^{Iso} = \frac{K_I}{Q\sqrt{r}} \cdot f_{11}(r, \theta) + \frac{K_{II}}{Q\sqrt{r}} \cdot g_{11}(r, \theta) \quad (15)$$

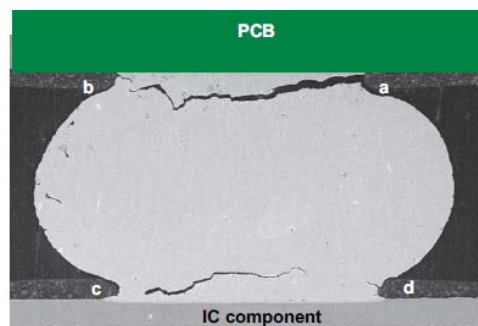
$$\sigma_{yy}^{Iso} = \frac{K_I}{Q\sqrt{r}} \cdot f_{22}(r, \theta) + \frac{K_{II}}{Q\sqrt{r}} \cdot g_{22}(r, \theta) \quad (16)$$

$$\sigma_{xy}^{Iso} = \frac{K_I}{Q\sqrt{r}} \cdot f_{12}(r, \theta) + \frac{K_{II}}{Q\sqrt{r}} \cdot g_{12}(r, \theta) \quad (17)$$

که ضرایب  $f_{ij}$  و  $g_{ij}$  در معادلات (۱۸) تا (۲۳) بیان شده‌اند [۳۵].

$$f_{11}(r, \theta) = S \left\{ \begin{aligned} &3 \cos\left(\frac{\theta}{2} + \varepsilon \ln \frac{r}{l}\right) - \sin \theta \cdot \sin\left(\frac{3\theta}{2} + \varepsilon \ln \frac{r}{l}\right) \\ &+ 2\varepsilon \sin \theta \cdot \cos\left(\frac{3\theta}{2} + \varepsilon \ln \frac{r}{l}\right) \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

$$-\frac{1}{S} \cos\left(-\frac{\theta}{2} + \varepsilon \ln \frac{r}{l}\right)$$



شکل (۸) - نمونه‌ای از گسترش ترک در اتصال لحیمی [۳۳]

حال در این بخش، رشد ترک سطحی بین بورد الکترونیک و اتصالات لحیم مدل‌سازی می‌شود. بورد الکترونیک و لحیم به ترتیب به عنوان یک ماده اورتوتروپیک و ایزوتروپیک در نظر گرفته می‌شوند. به این ترتیب، در این بخش بررسی شکست مربوط به ترک سطحی بین دو ماده اورتوتروپیک و ایزوتروپیک تحت بارگذاری مود ترکیبی I/II انجام می‌شود.

ترک سطحی سه مسیر احتمالی تحت بارگذاری مود ترکیبی I/II در پیش‌روی خود دارد. بیش‌ترین احتمال مسیر ممکن در امتداد فصل مشترک دو ماده است. زیرا استحکام پیوند سطحی عموماً ضعیف‌تر از استحکام مواد همگن است. با این حال در صورتی که استحکام پیوند سطحی به اندازه کافی قوی باشد و ترک در معرض تنش‌های برشی قرار گیرد، ممکن است ترک در یکی از دو ماده از سطح مشترک خارج شود. در این مقاله، به مورد اول یعنی انتشار ترک در فصل مشترک دو ماده پرداخته می‌شود. ترک‌های سطحی یکی از رایج‌ترین مودهای واماندگی در محیط‌های دو ماده‌ای هستند. به منظور پیش‌بینی رشد ترک در ترک‌های سطحی مطالعات گسترده‌ای بر روی میدان تنش و جابه‌جایی اطراف نوک ترک تحت بارگذاری مود ترکیبی I/II انجام شده است [۳۴]. همان‌طور که در شکل (۹) نشان داده شده، ترک در سطح بین دو ماده ایزوتروپیک و اورتوتروپیک قرار گرفته است.

$$Q = 2\sqrt{2} \cosh(\pi\varepsilon) \quad (26)$$

که  $G_{12}$  مدول برشی صفحه بورد الکترونیک و  $G_1$  مدول برشی لحیم است.  $\kappa_j = 3 - 4\nu_j$  و  $\kappa_j = \frac{3 - \nu_j}{1 + \nu_j}$  به ترتیب

در شرایط تنش صفحه‌ای و کرنش صفحه‌ای تعریف می‌شوند. مقدار تنش مماسی در ماده ایزوتروپیک در نهایت به صورت زیر استخراج می‌شود:

$$\sigma_{\theta\theta}^{Iso} = \sin^2 \theta \cdot \sigma_{xx}^{Iso} + \cos^2 \theta \cdot \sigma_{yy}^{Iso} - 2 \cos \theta \sin \theta \cdot \sigma_{xy}^{Iso} \quad (27)$$

حال مقدار تنش مماسی در ماده اورتوتروپیک بر مبنای مفهوم جامد ایزوتروپیک تقویت شده و با استفاده از معادلات (۱۳) و (۱۴)، به صورت زیر استخراج می‌شود:

$$\sigma_{\theta\theta}^{orth} = \frac{\sin^2 \theta}{\alpha_1} \cdot \sigma_{xx}^{Iso} + \cos^2 \theta \cdot \sigma_{yy}^{Iso} - \frac{2 \cos \theta \sin \theta}{\alpha_3} \cdot \sigma_{xy}^{Iso} \quad (28)$$

با هدف توسعه معیار بیش‌ترین تنش مماسی برای ترک‌های سطحی بین دو ماده ایزوتروپیک و اورتوتروپیک تحت بارگذاری مود ترکیبی  $||/||$  مقدار  $\sigma_{\theta\theta}^{orth}$  استخراج شد. بر مبنای مفهوم معیار حداکثر تنش مماسی، شکست زمانی رخ می‌دهد که تنش مماسی به مقدار  $\sigma_{\theta\theta c}$  برسد. به علاوه، ترک در جهتی شروع به رشد می‌کند که تنش مماسی به حداکثر مقدار خود برسد)

$$\left( \frac{\partial \sigma_{\theta\theta}}{\partial \theta} \right) = 0$$

به منظور مطالعه رفتار شکست لحیم، در این بخش معیار حداکثر تنش مماسی ارائه می‌شود. این معیار بیان می‌کند که در نزدیکی نوک ترک، ترک در جهت شعاعی شروع به رشد می‌کند. بر مبنای این معیار می‌توان جهت و لحظه شروع رشد ترک را پیش‌بینی کرد:

(۱) ترک در جهتی رشد می‌کند که تنش مماسی به

حداکثر مقدار خود برسد.

(۲) ترک در لحظه‌ای شروع به رشد می‌کند که تنش

مماسی به مقدار بحرانی خود برسد. این مقدار بحرانی

جزیی از خواص ماده است.

به این ترتیب، ترک زمانی شروع به رشد می‌کند که روابط زیر

برای ماده اورتوتروپیک برقرار باشد:

$$f_{22}(r, \theta) = S \begin{cases} \cos\left(\frac{\theta}{2} + \varepsilon \ln \frac{r}{l}\right) + \sin \theta \cdot \sin\left(\frac{3\theta}{2} + \varepsilon \ln \frac{r}{l}\right) \\ -2\varepsilon \sin \theta \cdot \cos\left(\frac{3\theta}{2} + \varepsilon \ln \frac{r}{l}\right) \end{cases} \quad (19)$$

$$+ \frac{1}{S} \cos\left(-\frac{\theta}{2} + \varepsilon \ln \frac{r}{l}\right)$$

$$f_{12}(r, \theta) = S \begin{cases} \sin\left(\frac{\theta}{2} + \varepsilon \ln \frac{r}{l}\right) + \sin \theta \cdot \cos\left(\frac{3\theta}{2} + \varepsilon \ln \frac{r}{l}\right) \\ +2\varepsilon \sin \theta \cdot \sin\left(\frac{3\theta}{2} + \varepsilon \ln \frac{r}{l}\right) \end{cases} \quad (20)$$

$$+ \frac{1}{S} \sin\left(-\frac{\theta}{2} + \varepsilon \ln \frac{r}{l}\right)$$

$$g_{11}(r, \theta) = S \begin{cases} -3 \sin\left(\frac{\theta}{2} + \varepsilon \ln \frac{r}{l}\right) - \sin \theta \cdot \cos\left(\frac{3\theta}{2} + \varepsilon \ln \frac{r}{l}\right) \\ -2\varepsilon \sin \theta \cdot \sin\left(\frac{3\theta}{2} + \varepsilon \ln \frac{r}{l}\right) \end{cases} \quad (21)$$

$$- \frac{1}{S} \sin\left(\frac{\theta}{2} + \varepsilon \ln \frac{r}{l}\right)$$

$$g_{22}(r, \theta) = S \begin{cases} -\sin\left(\frac{\theta}{2} + \varepsilon \ln \frac{r}{l}\right) + \sin \theta \cdot \cos\left(\frac{3\theta}{2} + \varepsilon \ln \frac{r}{l}\right) \\ +2\varepsilon \sin \theta \cdot \sin\left(\frac{3\theta}{2} + \varepsilon \ln \frac{r}{l}\right) \end{cases} \quad (22)$$

$$+ \frac{1}{S} \sin\left(\frac{\theta}{2} - \varepsilon \ln \frac{r}{l}\right)$$

$$g_{12}(r, \theta) = S \begin{cases} \cos\left(\frac{\theta}{2} + \varepsilon \ln \frac{r}{l}\right) - \sin \theta \cdot \sin\left(\frac{3\theta}{2} + \varepsilon \ln \frac{r}{l}\right) \\ +2\varepsilon \sin \theta \cdot \cos\left(\frac{3\theta}{2} + \varepsilon \ln \frac{r}{l}\right) \end{cases} \quad (23)$$

$$+ \frac{1}{S} \cos\left(-\frac{\theta}{2} + \varepsilon \ln \frac{r}{l}\right)$$

ضرایب  $S$ ،  $Q$  و  $\varepsilon$  نیز به صورت زیر برای ماده ۱ (لحیم) و ماده ۲ (بوردهای الکترونیک از جنس ماده کامپوزیتی) تعریف می‌شوند [۳۵]:

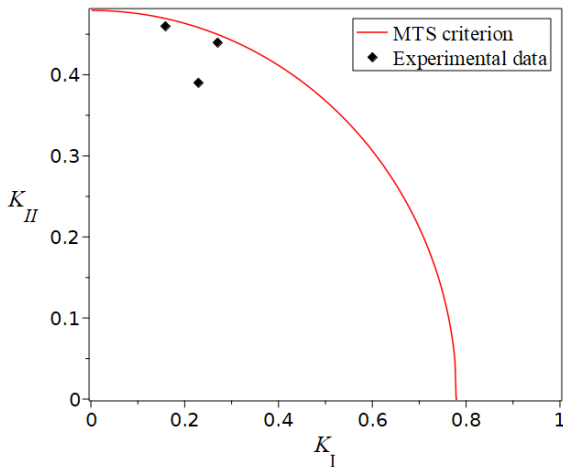
$$\varepsilon = \frac{1}{2\pi} \ln \left( \frac{(G_{12})_2 \kappa_1 + G_1}{G_1 \kappa_2 + (G_{12})_2} \right) \quad (24)$$

$$S = e^{-\varepsilon(\pi - \theta)} \quad (25)$$

اپوکسی قرار گرفته است. خواص این دو ماده به صورت جدول (۱) است.

جدول (۱): خواص مکانیکی مواد [۱۶]

ماده	$E(GPa)$	$\nu$	$K_{Ic}(MPa\sqrt{m})$
آلومینیوم	72.52	0.37	-
اپوکسی	2.9	0.38	0.78



شکل ۱۰- منحنی حد شکست ترک سطحی بین دو ماده غیرمشابه و مقایسه با داده‌های تجربی از مرجع [۱۶]

با استفاده از خواص مکانیکی در جدول (۱) و معادلات (۲۹) و (۳۱)، می‌توان منحنی حد شکست ترک سطحی بین آلومینیوم و اپوکسی را بر مبنای معیار حداکثر تنش مماسی ترسیم کرد. این منحنی را می‌توان با داده‌های تجربی موجود در مرجع رویژ [۱۶]<sup>۲</sup> مقایسه کرد تا اعتبار معیار شکست ترک سطحی ارائه شده مورد ارزیابی قرار گیرد. در شکل (۱۰)، مقایسه منحنی حد شکست و داده‌های تجربی نشان داده شده است. با توجه به نزدیکی منحنی ارائه شده به داده‌های تجربی می‌توان دریافت معیار ارائه شده اعتبار کافی برای پیش‌بینی و بررسی شکست ترک سطحی بین دو ماده غیرمشابه تحت بارگذاری مود ترکیبی I/II را دارد. به این ترتیب، می‌توان شکست بوردهای الکترونیک را بر مبنای معیار حداکثر تنش مماسی مورد بررسی قرار داد.

$$\sigma_{\theta\theta c}^{orth} = \frac{K_{Ic}}{Q\sqrt{r}} \left[ \frac{\sin^2 \theta}{\alpha_1} f_{11}(r, \theta) + \cos^2 \theta f_{22}(r, \theta) - \frac{2 \cos \theta \sin \theta}{\alpha_3} f_{12}(r, \theta) \right] \quad (29)$$

$$+ \frac{K_{II}}{Q\sqrt{r}} \left[ \frac{\sin^2 \theta}{\alpha_1} g_{11}(r, \theta) + \cos^2 \theta g_{22}(r, \theta) - \frac{2 \cos \theta \sin \theta}{\alpha_3} g_{12}(r, \theta) \right] \quad (30)$$

$$\sigma_{\theta\theta c}^{orth} = \frac{(K_{Ic})^{orth}}{\sqrt{2\pi(r_c)^{orth}}} \quad (30)$$

مقادیر  $K_{Ic}$  و  $r_c$ ، خواص مکانیکی ماده هستند. به علاوه، ترک در جهتی شروع به رشد می‌کند که تنش مماسی به حداکثر مقدار خود برسد. به این ترتیب، برای مواد اورتوتروپیک روابط زیر برقرار است:

$$\frac{\partial \sigma_{\theta\theta c}^{orth}}{\partial \theta} = \frac{K_{Ic}}{Q\sqrt{r}} \left[ \frac{\partial}{\partial \theta} \left[ \frac{\sin^2 \theta}{\alpha_1} f_{11}(r, \theta) + \cos^2 \theta f_{22}(r, \theta) - \frac{2 \cos \theta \sin \theta}{\alpha_3} f_{12}(r, \theta) \right] \right] \quad (31)$$

$$+ \frac{K_{II}}{Q\sqrt{r}} \left[ \frac{\partial}{\partial \theta} \left[ \frac{\sin^2 \theta}{\alpha_1} g_{11}(r, \theta) + \cos^2 \theta g_{22}(r, \theta) - \frac{2 \cos \theta \sin \theta}{\alpha_3} g_{12}(r, \theta) \right] \right] = 0 \quad (32)$$

با حل هم‌زمان معادلات (۲۹) و (۳۱) در نرم‌افزار میپل<sup>۱</sup>، می‌توان رفتار شکست را در ترک‌های سطحی بین بورد الکترونیک و لحیم مورد بررسی قرار داد. حل هم‌زمان دو معادله سبب می‌شود منحنی حد شکست ترک سطحی بین بورد الکترونیک و لحیم ترسیم شود و رفتار شکست در ترک سطحی مورد بررسی قرار گیرد. به این ترتیب، معیار حداکثر تنش مماسی به منظور پیش‌بینی رفتار شکست با حل هم‌زمان معادلات (۲۹) و (۳۱) مربوط به جهت و لحظه شروع رشد ترک سطحی توسعه می‌یابد.

## ۸- بررسی و تحلیل نتایج

با هدف اعتبارسنجی معیار ارائه شده، این معیار در دو مثال برای مدل‌سازی ترک سطحی بین دو ماده ایزوتروپیک و بین اتصال بورد الکترونیک و لحیم به کار برده می‌شود، تا صحت معیار ارائه شده ارزیابی شود.

### ۸-۱- مثال اول

به منظور صحت‌سنجی معیار حداکثر تنش مماسی، تست شکست ترک سطحی بین دو ماده غیرمشابه تحت بارگذاری مود ترکیبی I/II با استفاده از نمونه تست دایره‌ای شکل با ترک سطحی انجام می‌شود. ترک در بین دو ماده آلومینیوم و رزین

<sup>2</sup> Ryoji

<sup>1</sup> Maple

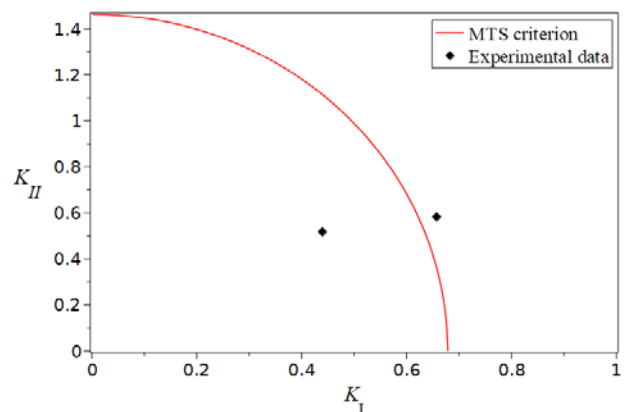
## ۲-۸-مثال دوم

با هدف اعتبارسنجی دقیق‌تر معیار بیش‌ترین تنش مماسی برای بررسی ترک سطحی در اتصال بین برد الکترونیک و لحیم معیار ارائه شده برای یک برد الکترونیک و اتصال لحیم با مشخصات جدول (۲) مدل می‌شود:

جدول (۲): خواص مکانیکی مواد [۳۶]

ماده	$E(GPa)$	$\nu$
برد الکترونیک	22.2	0.28
لحیم از جنس آلیاژ قلع و سرب	42.830	0.35

هم‌چنین، مقدار چقرمگی شکست سطحی برابر با استفاده از معیار حداکثر تنش مماسی منحنی حد شکست را برای ترک سطحی بین برد الکترونیک و لحیم به صورت شکل (۱۱) ترسیم کرد. این منحنی با داده‌های تجربی در مرجع شی<sup>۱</sup> [۳۶] صحت‌سنجی می‌شود. با توجه به نزدیکی داده‌های تجربی به منحنی حد شکست، می‌توان دریافت معیار ارائه شده معیار کارآمدی برای پیش‌بینی رشد ترک‌های سطحی بین برد الکترونیک و لحیم است.



شکل ۱۱- مقایسه منحنی حد شکست ترک سطحی بین برد الکترونیک و لحیم با داده‌های تجربی از مرجع [۳۶]

## ۹-نتیجه‌گیری

مطالعه و تحلیل عملکرد فضاپیماها در حین عملکردشان موضوع مهمی است که در مطالعات اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. ارتعاشات تصادفی اعمال شده بر روی وسایل الکترونیکی فضاپیماها در زمان پرتاب و در طول مأموریت در فضا، بر روی کارکرد بوردهای الکترونیکی اثرات مخرب ایجاد می‌کند. با هدف سهولت در تحلیل و مدل‌سازی ارتعاشات تصادفی، این بارگذاری به صورت شبه استاتیک فرض می‌شوند. سطوح ارتعاشات تصادفی سبب تخریب برد الکترونیکی می‌شود. به این ترتیب، بررسی تخریب و شکست بوردهای الکترونیک اهمیت ویژه‌ای دارد. محیط‌های ارتعاشات تصادفی عامل اصلی شکست در اغلب پرتاب‌های اولیه در ماهواره‌ها اعلام شده است. در این پژوهش با هدف بررسی رفتار شکست برد الکترونیک، بارگذاری ارتعاشات تصادفی با بارگذاری مود ترکیبی I/II معادل‌سازی شد. همچنین رویکرد نوینی برای بررسی شکست برد الکترونیک و لحیم ارائه شد. شکست برد الکترونیک با در نظر گرفتن ترک سطحی بین برد الکترونیک و لحیم تحت بارگذاری مود ترکیبی I/II مورد بررسی قرار گرفت. به این ترتیب، معیار شکست جدیدی بر مبنای رویکرد حداکثر تنش مماسی برای ترک سطحی بین دو ماده ایزوتروپیک (لحیم) و اورتوتروپیک (برد الکترونیک) ارائه شد. بر مبنای این معیار رفتار شکست برد الکترونیک مورد مطالعه قرار گرفت. منحنی حد شکست برد الکترونیک با استفاده از خواص مکانیکی برد الکترونیک و لحیم ترسیم شده و با داده‌های موجود در تست‌های تجربی مقایسه شد. به این ترتیب، می‌توان دریافت که معیار شکست ارائه شده دقت کافی برای پیش‌بینی رفتار شکست برد های الکترونیک را داراست.

## تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

## مراجع

- [۱] M. Safarabadi, H. Haghshenas, and H. Kelardeh, "Design of micro-vibration isolation

- [۱۴] M. Mirsayar and P. Park, "The role of T-stress on kinking angle of interface cracks", *Materials & Design*, vol. 80, pp. 12-19, 2015.
- [۱۵] M.-Y. He and J. W. Hutchinson, "Kinking of a crack out of an interface," 1989.
- [۱۶] Y. Ryoji and X. Jin-Quan, "Stress based criterion for an interface crack kinking out of the interface in dissimilar materials," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 41, no. 5, pp. 635-644, 1992.
- [۱۷] N.-A. Noda, T. Miyazaki, R. Li, T. Uchikoba, Y. Sano, and Y. Takase, "Debonding strength evaluation in terms of the intensity of singular stress at the interface corner with and without fictitious crack," *International Journal of Adhesion and adhesives*, vol. 61, pp. 46-64, 2015.
- [۱۸] J. Rice, "Elastic fracture mechanics concepts for interfacial cracks," 1988.
- [۱۹] J. W. Hutchinson and Z. Suo, "Mixed mode cracking in layered materials," *Advances in applied mechanics*, vol. 29, pp. 63-191, 1991.
- [۲۰] P. Charalambides, J. Lund, A. Evans, and R. McMeeking, "A test specimen for determining the fracture resistance of bimaterial interfaces," 1989.
- [۲۱] W. Qian and C. Sun, "Methods for calculating stress intensity factors for interfacial cracks between two orthotropic solids," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 35, no. 25, pp. 3317-3330, 1998.
- [۲۲] C. Sun and M. Manoharan, "Strain energy release rates of an interfacial crack between two orthotropic solids," *Journal of Composite Materials*, vol. 23, no. 5, pp. 460-478, 1989.
- [۲۳] R. Ghaffarian, "CCGA packages for space applications," *Microelectronics Reliability*, vol. 46, no. 12, 2006.
- [۲۴] J. Caers *et al.*, "A study of crack propagation in Pb-free solder joints under drop impact," in *2008 58th Electronic Components and Technology Conference*, 2008: IEEE, pp. 1166-1172.
- [۲۵] D. S. Steinberg, "Vibration analysis for electronic equipment," 2000.
- [۲۶] M. A. Gharaibeh and J.M. Pitarresi, "Random vibration fatigue life analysis of electronic packages by analytical solutions and Taguchi method," *Microelectronics Reliability*, vol. 102, p. 113475, 2019.
- [۲۷] J. Wijker, *Miles' Equation in Random Vibrations*. Springer, 2018.
- [۲۸] J. J. Wijker, *Random vibrations in spacecraft structures design: theory and applications*. Springer Science & Business Media, 2009.
- [۲۹] K. Subramanya, J. K. Pandit, C. Prasad, and M. Thyagaraj, "Vibration analysis study of spacecraft electronic package: a review," *International Journal of Science, Engineering* system for a remote-sensing satellite payload using viscoelastic Materials," *Engineering Solid Mechanics*, vol. 8, no. 1, pp. 69-76, 2020.
- [۳] M. Safarabadi and S. Bazargan, "Prediction of equivalent static loads act on a micro satellite via modal analysis," *Engineering Solid Mechanics*, vol. 3, no. 2, pp. 75-84, 2015.
- [۳] H. Emami, F. Farhani, and M. Safarabadi, "Influence of modal effective mass distribution on the static and dynamic behavior of a satellite structure under base excitations," *Material Science Research of India*, vol. 5, no. 2, pp. 209-218, 2008.
- [۴] B. Aytekin and H. N. Ozguven, "Vibration analysis of a simply supported PCB with a component-an analytical approach," in *2008 10th Electronics Packaging Technology Conference*, 2008: IEEE, pp. 1178-1183.
- [۵] D. Barker, "Local PWB and component bowing of an assembly subjected to a bending moment," 1994.
- [۶] J. H. Lau, C. Chang, and S.-W. Lee, "Solder joint crack propagation analysis of wafer-level chip scale package on printed circuit board assemblies," *IEEE Transactions on components and packaging Technologies*, vol. 24, no. 2, pp. 285-292, 2001.
- [۷] S. Akbari, A. Nourani, and J. K. Spelt, "Effect of solder joint length on fracture under bending," *Journal of Electronic Materials*, vol. 45, pp. 473-485, 2016.
- [۸] S. P. Nadimpalli and J. K. Spelt, "Mixed-mode fracture load prediction in lead-free solder joints," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 78, no. 2, pp. ۲۰۱۱, ۲۲۳-۲۱۷.
- [۹] S. P. Nadimpalli and J. K. Spelt, "Prediction of pad cratering fracture at the copper pad-Printed circuit board interface," *Microelectronics Reliability*, vol. 52, no. 7, pp. 1454-1463, 2012.
- [۱۰] X. Chen, Y. Lin, X. Liu, and G.-Q. Lu, "Fracture mechanics analysis of the effect of substrate flexibility on solder joint reliability," *Engineering fracture mechanics*, vol. 72, no. 17, pp. 2628-2646, 2005.
- [۱۱] C. Wu, J. Lai, and Y.-I. Wu, "Thermal-mechanical interface crack behaviour of a surface mount solder joint," *Finite elements in analysis and design*, vol. 30, no. 1-2, pp. 19-30, 1998.
- [۱۲] M. Mirsayar, "On fracture of kinked interface cracks-The role of T-stress," *Materials & Design*, vol. 61, pp. 117-123, 2014.
- [۱۳] D. Mulville, P. Mast, and R. Vaishnav, "Strain energy release rate for interfacial cracks between dissimilar media," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 8, no. 3, pp. 555-565, 1976.



#### COPYRIGHTS

© 2024 by the authors. Licensee Iranian Space Research Center of Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

- and Technology Research, vol. 3, no. 3, pp. 503-507, 2014.
- [۳۰] L. O. Jernkvist, "Fracture of wood under mixed mode loading: I. Derivation of fracture criteria," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 68, no. 5, pp. 549-563, 2001.
- [۳۱] T. Van der Put, "A new fracture mechanics theory for orthotropic materials like wood," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 74, no. 5, pp. 771-781, 2007.
- [۳۲] M. Fakoor and H. M. Farid, "Mixed-mode I/II fracture criterion for crack initiation assessment of composite materials," *Acta Mechanica*, vol. 230, no. 1, pp. 281-301, 2019.
- [۳۳] E. Wong and C. Wong, "Approximate solutions for the stresses in the solder joints of a printed circuit board subjected to mechanical bending," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 51, no. 2, pp. 152-158, 2009.
- [۳۴] C. T. Sun and C. Jih, "On strain energy release rates for interfacial cracks in bi-material media," *Engineering fracture mechanics*, vol. 28, no. 1, pp. 13-20, 1987.
- [۳۵] M. Ravichandran and K. Ramesh, "Evaluation of stress field parameters for an interface crack in a bimaterial by digital photoelasticity," *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, vol. 40, no. 4, pp. 327-344, 2005.
- [۳۶] H. Pang, X. Zhang, X. Shi, and Z. Wang, "Modeling interface fracture in flip chip assembly," in *52nd Electronic Components and Technology Conference 2002.(Cat. No. 02CH37345)*, 2002: IEEE, pp. 1757-1761 .