



پیش‌بینی رشد ترک در فولاد سازه‌های اس.تی ۵۲ با استفاده از آزمون نشر آوایی و کاربرد آن برای سازه‌های فولادی

محمد ریاحی*، سید مصطفی مطلوبی^۱، سید میلاد حسین نژاد^۱
^۱دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۶/۰۳/۲۹
بازنگری: ۱۳۹۷/۰۱/۲۱
پذیرش: ۱۳۹۷/۰۲/۰۲
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷/۰۳/۱۶

کلمات کلیدی:

پل فلزی، عمر خستگی
نشر آوایی
پایش سلامت سازه
رشد ترک.

خلاصه: فناوری نشر آوایی، یکی از روش‌های نوین در زمینه آزمون‌های غیر مخرب می‌باشد که قابلیت بررسی رشد ترک در قطعات فلزی را داشته و برای به کارگیری بر روی سازه‌هایی نظیر پل جهت بررسی و وضعیت اعضای آن مناسب می‌باشد و اطلاعات این آزمون می‌تواند برای برنامه‌ریزی زمان‌بندی نگهداری سازه پل به کار رود. در راستای پژوهش‌های تجربی، نمونه‌هایی از جنس فولاد سازه‌های اس.تی ۵۲ به صورت نمونه‌های کششی فشرده تحت بارگذاری خستگی محوری به منظور بررسی رشد ترک به همراه فیکسچر مورد نیاز نیز تهیه شد. سپس با کمک نتایج حاصل از آزمون‌های تجربی ارتباط بین پارامترهای نشر آوایی از جمله نرخ انرژی و نرخ شمارش، رشد ترک و عمر خستگی مورد بررسی قرار گرفته است. سپس با استفاده از نتایج استخراج‌شده از آزمون نشر آوایی و خستگی و با استفاده از تحلیل رگرسیون حداقل مربعات، مقادیر ثابت آن‌ها محاسبه شده و نهایتاً طول ترک اندازه‌گیری شده و نتایج آن ارائه گردیده است.

۱- مقدمه

پل‌ها در حال افزایش سن و سال، و ترافیک در حال رشد است و این امر به افزایش تقاضا برای روش‌های ارزیابی دقیق عمر خستگی پل‌ها منجر می‌شود. این امر، صاحبان پل‌ها را به بررسی سلامت سازه و ارزیابی عمر باقی‌مانده آن ملزم می‌سازد. پایش سلامت سازه‌ها، تکنیکی است که به بررسی سلامت سازه با استفاده از روش‌های غیر مخرب پرداخته و اطلاعات مفیدی از شرایط پل را در اختیار می‌گذارد. به عنوان مثال می‌توان به استفاده از سنسورهای مانند کرنش‌سنج، شتاب‌سنج، تغییرمکان‌سنج و غیره برای پایش سلامت سازه‌ها اشاره کرد. همچنین تست‌های غیر مخرب همچون اشعه ایکس، التراسونیک، جریان گردابی و تست مایع نافذ نیز در مراحل بازرسی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱].

عموماً دو روش برای ارزیابی عمر باقی‌مانده پل‌ها وجود دارد:

- رویکرد مکانیک شکست، که با استفاده از شدت تنش محلی، شروع ترک و انتشار آن توسط بارگذاری سیکلی به بررسی عمر قطعات می‌پردازد.
- رویکرد کلاسیک، استفاده از منحنی تنش-چرخه^۱ پالمگرن-مایر برای

تخمین آسیب تجمعی با به‌کارگیری طیف بارگذاری با احتمال مقبول که شکست خستگی قبل از تعداد سیکل‌های پیش‌بینی شده اتفاق نمی‌افتد [۱]. یکی از انواع آسیب‌دیدگی در پل‌های فولادی ترک خوردگی ناشی از خستگی است. این نوع ترک خوردگی می‌تواند منجر به شکست‌های ناگهانی و فاجعه‌آمیز در پل‌ها گردد. از این رو آگاهی از ماهیت و نحوه شکل‌گیری و محل احتمالی بروز این ترک‌ها لازمه این‌گونه ارزیابی‌ها می‌باشد. خستگی به حالتی اطلاق می‌شود که در آن آسیب‌های کوچک در جزئی که تحت بارگذاری تکراری قرار دارد ابتدا با سرعت کم جمع شده و سرعت رشد آن‌ها رفته رفته افزایش می‌یابد تا در نهایت منجر به خرابی می‌گردد. در هنگام خرابی ممکن است بارهای موثر بر عضو سازه‌ای حتی بسیار کمتر از ظرفیت مجاز باربری آن باشند. مکانیزم رشد ترک در اثر بارگذاری تکرارشونده در اعضایی است که عمدتاً تحت تنش کششی قرار دارند که این خرابی‌ها با کاهش سطح مقطع همراه بوده و به این ترتیب ناحیه آسیب دیده تاب بارگذاری تکراری را نداشته و شکست نهایی با ماهیتی ترد و ناگهانی رخ می‌دهد. از دید فراگیر در خستگی فلزات، پروسه خستگی با فرض وجود عیوب داخلی یا سطحی که تنش در آن متمرکز شده است و شامل جریان‌های برشی در امتداد صفحه لغزش است، شروع می‌شود. با توجه به وجود سیکل‌های زیاد،

1 Stress-Cycle (S-N) Curve

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Mostafa.matluby@gmail.com



سنسورهای پیزوالکتریک به پایش سلامت یک سازه کامپوزیتی از جنس شیشه/اپوکسی به روش نشر آوایی برای بارگذاری خستگی پرداختند، آن‌ها به کمک روش کا-مینز^۳ به شناسایی عیوب در کامپوزیت پرداخته و نتایج حاصل از دو نوع اتصال مختلف سنسور به نمونه را بررسی نمودند. بهنیا و همکاران [۹] به بررسی کاربرد روش نشر آوایی در پایش سلامت بتن پرداختند، آن‌ها به بررسی پارامترهای مختلف سیگنال نشر آوایی مانند بی-ولیو^۴، ال-بی-ولیو^۵ و انرژی سیگنال جهت تعیین گسترش آسیب در بتن پرداختند، همچنین آن‌ها پارامترهای نوین در زمینه نشر آوایی همچون کمینه بی-ولیو، سیفتد بی-ولیو^۶ و کیو-ولیو^۷ را مورد بررسی قرار دادند و در نهایت از یک روش هوشمند جهت پیش‌بینی عیوب استفاده نمودند. استرانزا^۸ و همکاران [۱۰] به بررسی رشد ترک تحت بارگذاری خستگی در ماده تیتانیوم 6Al4V که به روش تولید افزودنی^۹ تولید شده است پرداختند، برای این منظور آن‌ها از نمونه خمش چهار نقطه استفاده نموده و به بررسی پارامترهایی مانند شمارش تجمعی، ضربه، میانگین فرکانس و زمان خیزش پرداختند. میشلکوا^{۱۰} و روزک^{۱۱} [۱۱] از روش نشر آوایی جهت پایش سلامت یک سازه هوافضایی تحت بارگذاری خستگی استفاده نمودند، آن‌ها رشد ترک را با روش نشر آوایی و چشمی بررسی نموده و نتایج نشان داد که این روش دقت مناسبی برای این سازه دارا می‌باشد. دیکاس^{۱۲} و هریس^{۱۳} [۱۲] از روش نشر آوایی جهت پایش سلامت در یک سیلندر موتور احتراق داخلی دیزلی استفاده نمودند، آن‌ها با استفاده از ریشه میانگین مربعات^{۱۴} سیگنال به بررسی وضعیت سیلندر پرداختند، نتایج آن‌ها نشان داد که این روش دقت مناسبی در پایش وضعیت سیلندر دارد.

گاگار^{۱۵} و همکاران [۱۳] به بررسی پارامترهای تاثیرگذار بر روی سیگنال نشر آوایی حاصل از رشد ترک پرداختند، برای این منظور از نمونه‌هایی از جنس آلومینیوم ۲۰۱۴ تی ۶ استفاده نمودند، نتایج آن‌ها نشان داد که نرخ سیگنال نشر آوایی تغییرات واضحی در طول داده‌برداری دارد و از پارامتر شمارش می‌توان برای تعیین طول ترک استفاده نمود. در مواد پیزوالکتریک^{۱۶}، انرژی دریافت شده از سیگنال نشر

لغزش شروع به ایجاد اینترژن و اکستروژن در قطعه نموده که به تشکیل ترک منتهی شده و با انتشار ترک‌ها، سرانجام شکست خستگی در اعضای سازه‌ای رخ می‌دهد [۳ و ۲].

روش نشر آوایی یکی از روش‌های غیر مخرب می‌باشد که برای تشخیص و تعیین موقعیت عیوب در سازه‌های تحت بارگذاری و اجزای آن‌ها کاربرد فراوانی دارد. این روش می‌تواند اطلاعات جامعی از محل ترک‌ها در سازه‌های تحت تنش ارائه نماید و همچنین اطلاعاتی در مورد توسعه ترک‌ها در سازه‌هایی که تحت تنش پیوسته یا تکرار شونده هستند، ارائه دهد. در این تکنیک از پراکنده شدن یک موج ارتجاعی به صورت گسیل سریع انرژی مربوط به تغییرشکل غیر ارتجاعی یا توسعه عیوب در یک مصالح تحت تنش برای ارزیابی شرایط آن استفاده می‌شود. این تکنیک می‌تواند در ارزیابی غیر مخرب رشد ترک در فلزات به کار رفته و معیاری برای بررسی سلامت سازه‌هایی همچون پل‌ها باشد. از مزایای قابل توجه این روش می‌توان به عدم نیاز به دانستن محل دقیق ترک اشاره کرد و حساسیت این تکنیک در یافتن ترک‌های خستگی با طول کمتر از ۱۰ میکرون اشاره نمود، همچنین با الگوریتم مناسب در چیدن سنسورها می‌توان محل و اندازه طول ترک را با دقت مناسبی تعیین نمود. ارتباط بین پارامترهای ترک خستگی و داده‌های نشر آوایی پایه و اساس پایش سلامت سازه‌ای با استفاده از این تکنیک می‌باشد. پارامترهایی همچون طول ترک، نرخ رشد ترک و شدت تنش که با مکانیک شکست الاستیک خطی ارتباط دارند، به عنوان شاخص آسیب خستگی و به دنبال آن ارزیابی عمر خستگی باقی‌مانده به کار روند [۵ و ۴].

هریس و دونگان [۶] به ارائه مدلی برای توصیف رابطه بین نرخ شمارش نشر آوایی و فاکتور محدوده شدت تنش پرداختند. به دنبال آن لیندلی و همکاران با در نظر گرفتن اینکه نرخ شمارش به دست آمده تنها از رشد ترک نمی‌باشد و تغییر شکل پلاستیک، شکست، اصطکاک و سایش نیز در آن موثر است، به بهبود و اصلاح روابط پرداختند، هدف آن‌ها به دست آوردن رابطه مشخصی بین نرخ شمارش و شدت تنش برای مواد مورد نیاز بود. نتایج به دست آمده نشان داد که منحنی نرخ شمارش نشر آوایی در برابر محدوده شدت تنش، پراکندگی بسیار زیادی را دارا می‌باشد.

روش نشر آوایی جهت عیب‌یابی و پایش وضعیت در مواد مختلف قابل استفاده می‌باشد، زاخاری^۱ و همکاران [۷] با استفاده از سیگنال‌های نشر آوایی همراه با شبکه عصبی به پایش وضعیت سازه‌ها پرداختند، آن‌ها به بررسی تعیین محل و طول ترک در آلومینیوم ۲۰۲۴-تی ۳۰ پرداختند، نتایج آن‌ها نشان داد که ترکیب این دو روش تا ۹۵٪ دقت دارد. مسعودی^۲ و همکاران [۸] با استفاده از

- 3 K-Means
- 4 B-Value
- 5 Lb-Value
- 6 Sifted B-Value
- 7 Q-Value
- 8 Strantza
- 9 Additive Manufacturing
- 10 Michalcová
- 11 Růžek
- 12 Dykas
- 13 Harris
- 14 Root Mean Square (RMS)
- 15 Gagar
- 16 Piezoelectric

- 1 Zachary
- 2 Masmoudi

استفاده از دستگاه خستگی محوری تحت بارگذاری نوسانی قرار گرفته و به طور همزمان با نصب سنسورهای نشر آوایی و داده برداری به بررسی رفتار پارامترهای نشر آوایی و رشد ترک بر روی نمونه‌ها پرداخته شد.

۲- تئوری تحقیق

۲-۱- تئوری نشر آوایی در مکانیک شکست

رشد ترک در مواد با شکسته شدن پیوند بین مولکول‌ها رخ می‌دهد و در نتیجه با آزاد شدن انرژی همراه می‌باشد، این انرژی موجب ایجاد تغییر شکل‌های پلاستیک در ناحیه اطراف ترک شده و در نهایت به شکست جسم منجر می‌گردد. این انرژی بصورت زیر بیان می‌گردد:

$$J = g \cdot t \cdot a \quad (1)$$

$$K_{max}^2 \quad (2)$$

$$K_{max} = \frac{\Delta K}{(1-R)} \quad (3)$$

که در آن t ضخامت، a طول ترک و g نرخ انرژی آزاد شده می‌باشد. همچنین پارامتر فاکتور شدت تنش و مدول یانگ^۳ تحت تنش صفحه‌ای می‌باشد [۱۷].

اگر انرژی آزاد شده حاصل از رشد ترک (J) را با انرژی نشر آوایی (U) برابر فرض نماییم، می‌توان رابطه (۱) را به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$\frac{dU}{dN} = \frac{B \cdot t}{E'} \times \frac{\Delta K^2}{(1-R)^2} \times \frac{da}{dN} \quad (4)$$

در معادله (۴) ثابتی برای مواد، تعداد سیکل‌های بارگذاری، نسبت بارگذاری، نرخ انرژی نشر آوایی و نرخ رشد ترک می‌باشد. به منظور تعیین رابطه بین نرخ انرژی نشر آوایی و فاکتور شدت تنش، مقدار da/dN از معادله پاریس در مرحله رشد ترک متعادل (مرحله خطی)، جایگزین می‌شود:

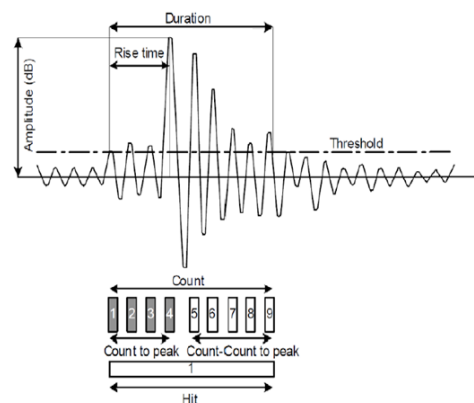
$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (5)$$

$$\frac{dU}{dN} = B_e \cdot (\Delta K)^p \quad (6)$$

$$B_e = \frac{(B \cdot t \cdot C)}{[E'(1-R)^2]}, \quad P = (m + 2) \quad (7)$$

در معادله (۵)، و برای مواد انعطاف پذیر در محدوده ۲-۴ می‌باشد. برای شرایط بارگذاری خاص می‌تواند به عنوان ثابت مواد در نظر گرفته شود. در نهایت رابطه بین نرخ رشد ترک و نرخ آزادسازی انرژی نشر آوایی بصورت رابطه (۸) بیان می‌گردد:

آوایی به ولتاژی متناسب با آن تبدیل می‌شود، که مقدار آن به حساسیت کریستال و ضخامت کریستال بستگی دارد، همچنین پارامترهای ضرب آهنگ (شمارش) و نرخ شمارش^۱ که از پارامترهای مهم می‌باشند علاوه بر فاکتورهای اشاره شده تا اندازه زیادی به میزان تقویت سطح الکترونیک و حد آستانه سنسورها وابسته می‌باشند، لذا نیاز است که بر روی سایر پارامترهای نشر آوایی نیز بررسی دقیقی صورت پذیرد [۱۴]. علت‌های مختلفی برای انتشار سیگنال نشر آوایی در حین بارگذاری نوسانی در یک قطعه وجود دارد، از جمله آن‌ها می‌توان به سیلان و تغییر شکل پلاستیک در نوک ترک، رشد ترک، سایش و اصطکاک بین سطوح ترک و نویزهای خارجی اشاره نمود. تمایز بین سیگنال‌های حاصل از ایجاد و رشد ترک و نویزها یکی از چالش‌های اولیه و مهم در استفاده از تکنیک نشر آوایی برای پایش وضعیت ترک می‌باشد، برای رفع این مشکل می‌توان از روش‌های فیلترینگ فاصله‌ای که بر اساس مکان منبع و زمان رسیدن سیگنال می‌باشد، به منظور تفکیک نویزهای خارجی از سیگنال حاصل از ترک‌ها استفاده نمود، این روش بر اساس اصول مکانیک شکست و پیش‌بینی مسیر رشد ترک در آزمایشگاه مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۵]. با این حال، این روش‌ها برای به حداقل رساندن نویزهای خارجی در آزمون‌های آزمایشگاهی مناسب می‌باشند ولی برای کاربردهای عملی پایش سلامت پل به دلیل اینکه محل ترک کمتر قابل پیش‌بینی است، کاربرد چندانی ندارند. از این رو روش آنالیز نشر آوایی بر اساس شکل موج و پارامترهای آن برای تفسیر و تحلیل سیگنال مورد استفاده قرار می‌گیرد (شکل ۱) [۱۶].

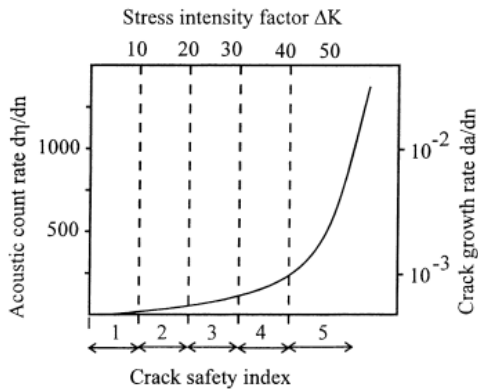


شکل ۱: مشخصه‌های سیگنال نشر آوایی [۱۶]
Fig1: Features of Acoustic Signal [6]

در این مقاله به بررسی رابطه بین نرخ انرژی نشر آوایی و نرخ رشد ترک و ارائه مدل تئوری برای ارزیابی عمر خستگی قطعات پرداخته شده است. برای این منظور نمونه‌های استاندارد کششی فشرده^۲ از جنس فولاد سازه‌ای ای.اس.تی ۵۲ مورد استفاده قرار گرفت. این نمونه‌ها با

- 1 Counting Rate
- 2 Compact Tension (CT)

با کمک رابطه (۱۵) و با حل عددی انتگرال، می‌توان به محاسبه طول ترک پرداخت، در این رابطه نرخ شمارش به صورت مستقیم با نرخ رشد ترک مدل‌سازی شده است و به فاکتور شدت تنش وابسته نمی‌باشد. به منظور طبقه‌بندی ترک‌های خستگی در پل‌های فلزی از یک شاخص ایمنی استفاده می‌گردد که بر اساس فاکتور شدت تنش به نواحی مختلف تقسیم می‌شود (شکل ۲).



شکل ۲: طبقه بندی ترک‌های خستگی بر اساس شاخص [۱۸].

Fig2: Classification of fatigue cracks based on index[18]

همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، وضعیت سازه با استفاده از شاخص ایمنی و بر اساس فاکتور شدت تنش به پنج ناحیه تقسیم شده است که نواحی اول مربوط به رفتارهای خطی و دو ناحیه پایانی مربوط به رشد غیر خطی ترک می‌باشد. لذا با کمک اطلاعات پایش کوتاه مدت نشر آوایی می‌توان به بررسی وضعیت ترک‌ها بر اساس این شاخص پرداخت.

۲-۲- نرخ رشد ترک خستگی

به منظور تعیین رابطه رشد ترک با انرژی آزاد شده در نمونه آزمایشگاهی علاوه بر اندازه‌گیری انرژی توسط سنسورهای نشر آوایی، لازم است تا طول ترک نیز تعیین گردد. یکی از روش‌های معمول جهت تعیین طول ترک، اندازه‌گیری بازشدگی دهانه ترک^۱ می‌باشد که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است. برای این منظور ابتدا میزان بازشدگی دهانه ترک با کمک یک اکتنوسومتر^۲ اندازه‌گیری شده سپس با استفاده از رابطه (۱۶) طول ترک محاسبه شده است [۱۹].

$$a = w(1.001 - 4.6695u_x + \quad (16)$$

$$18.4u_x^2 - 236.82u_x^3 + 1214.9u_x^4 - 2143.6u_x^5)$$

$$u_x = [\sqrt{E \cdot t \cdot d / P_{max}}]^{-1} \quad (17)$$

که در آن $W=80$ (mm) عرض موثر، $t=15/12$ (mm) ضخامت، $E=210$ (GPa) مدول یانگ و P_{max} حداکثر بار در بارگذاری سیکلی

$$\frac{da}{dN} = D \left(\frac{dU}{dN} \right)^q, \quad D = \frac{C}{B_e^q}, \quad q = \frac{m}{p} \quad (8)$$

ثابت‌های مورد نظر در روابط فوق (D و q) را می‌توان با استفاده از نتایج تجربی تعیین نمود. پس از تعیین مقادیر مورد نظر می‌توان از رابطه (۸) برای تخمین طول ترک و پیش‌بینی عمر باقی‌مانده ماده مورد نظر استفاده نمود. اگر میزان انرژی در چند سیکل مختلف مشخص باشد، با استفاده از قانون سیمپسون و حل عددی انتگرال می‌توان طول ترک را بر حسب تعداد سیکل به دست آورد [۱۷].

$$a_{j+2} - a_j = \frac{N_{j+2} - N_j}{6} [G(N_j) + 4G(N_j) + G(N_{j+2})] \quad (9)$$

پارامتر مهم دیگری که می‌توان از آن به عنوان شاخصی در بارگذاری نوسانی استفاده کرد، شمارش جمعی (تعداد دفعاتی که انرژی سیگنال خروجی در یک دوره زمانی بالاتر از حد آستانه قرار داشته باشد) می‌باشد. نرخ شمارش در بارگذاری نوسانی توسط یک رابطه توانی مشابه رابطه رشد ترک پاریس-اردوگان ارائه شده است. این رابطه توانی یک ارتباط طبیعی بین پایش وضعیت با استفاده از تکنیک نشر آوایی و روش مکانیک شکست کیفی برای پیش‌بینی نرخ رشد ترک ارائه می‌دهد.

$$\log \frac{da}{dN} = \log C + m \log \Delta K \quad (10)$$

$$\log \frac{dn}{dN} = \log B + p \log \Delta K \quad (11)$$

$$\log \left(\frac{da}{dN} \right) = \frac{m}{p} \log \left(\frac{dn}{dN} \right) + \log C - \frac{m}{p} \log B, \quad (12)$$

$$\frac{m}{p} = q$$

$$\log C - \frac{m}{p} \log B = \log D \quad (13)$$

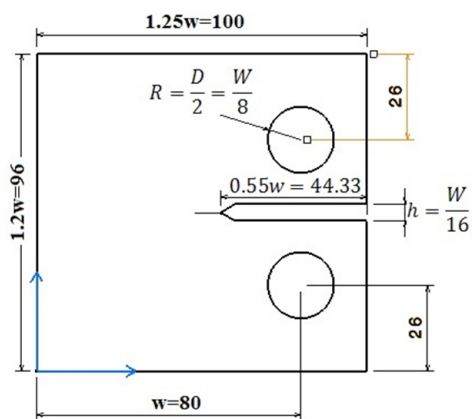
$$\log \left(\frac{da}{dN} \right) = q \log \left(\frac{dn}{dN} \right) + \log D \quad (14)$$

رابطه‌های (۱۰) و (۱۱) ارتباط خطی بین لگاریتم نرخ رشد ترک و لگاریتم نرخ شمارش نشر آوایی را ارائه می‌دهد که با استفاده از آن می‌توان به تخمین عمر خستگی بر اساس اطلاعات پایش کوتاه مدت نشر آوایی پرداخت. در شرایط عملی، امکان یافتن برخی ترک‌های خستگی در بازرسی چشمی و پایش دشوار است. در این شرایط امکان پیش‌بینی رشد ترک توسط پایش دوره‌ای و یا مداوم با استفاده از تکنیک نشر آوایی وجود دارد [۱۸].

$$\frac{da}{dN} = D \left(\frac{dn}{dN} \right)^q \quad (15)$$

1 Crack Mouth Opening Displacement

2 Extensometer



شکل ۳: نمونه قطعه استاندارد کششی فشرده بر اساس ASTM E647 [۲۰]
 Fig3: Standard Compressed Sample piece based on ASTM E647

پس از تهیه نمونه‌ها به منظور انجام تست خستگی از یک دستگاه سانتام^۲ با قابلیت بارگذاری نوسانی که مجهز به یک کلیپ گیج جهت اندازه‌گیری میزان باز شده گی دهانه ترک بود استفاده گردید. به منظور اندازه‌گیری همزمان انرژی نشر آوایی از سیستم نشر آوایی آم.اس.وای-۵^۳ که ساخت شرکت والن سیستم^۴ از کشور آلمان می‌باشد، استفاده شد. سنسورهای استفاده شده در این پژوهش دارای محدوده فرکانسی ۱۰۰ تا ۴۵۰ کیلوهرتز با فرکانس رزونانس ۱۵۰ کیلوهرتز بودند که برای آزمایش بر روی فولادها مناسب بوده و بنابراین داده‌برداری با فرکانس ۱۰۰ کیلوهرتز انجام شده است. مقدار حد آستانه با توجه به محل آزمایش و مقدار صدای محیط متفاوت بوده و برای هر آزمایش ابتدا می‌بایست این مقدار تنظیم (حذف نویز) گردد. به علاوه این سیستم قابلیت نمایش هم‌زمان نمودارهای نشر آوایی و رشد ترک را بر روی نمایشگر کامپیوتر دارا است. شکل ۴ تجهیزات آزمون نشر آوایی مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۴: تجهیزات سیستم آکوستیک امیشن
 Fig4: Acoustic Emission Apparatus

می‌باشد. در نهایت می‌توان با استفاده از رابطه (۱۸) به محاسبه فاکتور شدت تنش پرداخت [۱۹]:

$$(18) \quad \Delta K = \frac{\Delta P \cdot (\gamma + \alpha)}{t w^{\frac{1}{2}} (1 - \alpha)^{\frac{1}{2}}} (0.886\alpha + 4.64\alpha^2 - 13.32\alpha^3 + 14.72\alpha^4 - 5.6\alpha^5)$$

که در آن $\Delta P = p_{max} - p_{min}$ و α برابر با a/w می‌باشد.

۳- روش تحقیق

به منظور تعیین رابطه بین انرژی نشر آوایی و طول ترک تعدادی تست خستگی بر روی نمونه‌های آزمایشگاهی صورت گرفت. برای ساخت نمونه‌ها از فولاد اس.تی ۵۲ که در ساخت پل‌های فلزی کاربرد فراوانی دارد استفاده گردید تا از نتایج آن بتوان برای تخمین عمر پل‌های فلزی بهره برد. به منظور اطمینان از صحت ماده استفاده شده برای ساخت نمونه‌ها، از سه نقطه آزمایش کوآنتومتری (آنالیز ترکیب شیمیایی) گرفته شده و میانگین نتایج در جدول ۱ گزارش شده است.

جدول ۱: درصد عناصر فولاد اس.تی ۵۲

Table 1: Percentage of Chemical Composition of St-52 Steel

عناصر	آهن	کربن	منگنز	سیلیسیم	کروم	مس	گوگرد	فسفر
درصد عنصر	۰/۲	۱/۳	۰/۲۵	۰/۳	۰/۲۵	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۴
وزنی پایه								

مقایسه نتایج این آزمون با داده‌های مربوط به ترکیب شیمیایی این فولاد در استاندارد کلید فولاد ارائه نشان‌دهنده مطابقت ماده مورد استفاده با استاندارد فولاد اس.تی ۵۲ می‌باشد. همچنین برای قرارگیری نمونه‌ها بر روی دستگاه، یک فیکسچر طراحی و ساخته شد جنس آن از فولاد وی.سی.ان ۱۵۰ انتخاب گردید تا استحکام تسلیم و خستگی مورد نیاز را داشته باشد و موجب ایجاد خطا در نتایج آزمون نگردد.

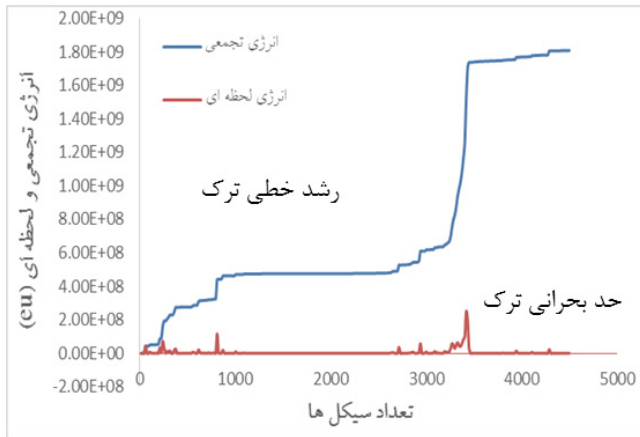
در این مطالعه از نمونه‌های کششی فشرده مطابق با استاندارد ASTM E647 استفاده شده است، این نمونه‌ها به صورت یک صفحه با طول ۱۰۰، عرض ۹۶ و دو ضخامت ۱۵ و ۱۲ میلی‌متر در نظر گرفته شد. از مزایای استفاده از نمونه کششی فشرده می‌توان به کوچک بودن و عدم نیاز به ماده زیاد، ایجاد مقادیر بالای شدت تنش برای بارگذاری‌های کم و همچنین شباهت رفتار آن با ترک‌های یک لبه در پل‌ها اشاره نمود. از معایب آن نیز می‌توان به تولید نسبتاً سخت آن و باز شدن ترک توسط ممان خمشی در قطعه که در قطعات پل همچین رفتاری وجود ندارد اشاره کرد. در شکل ۳ ابعاد استاندارد مربوط به این نمونه مشاهده می‌شود.

- 2 SANTAM
- 3 Acoustic Emission System
- 4 Vallen System GmbH

همانطور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، نسبت بارگذاری (نسبت بار بیشینه به بار کمینه) در همه موارد ثابت می‌باشد و میزان بارها تغییر یافته است، همچنین به منظور بررسی تاثیر ضخامت بر روی نتایج، داده‌برداری برای یک ضخامت متفاوت و بار یکسان نیز انجام شده است.

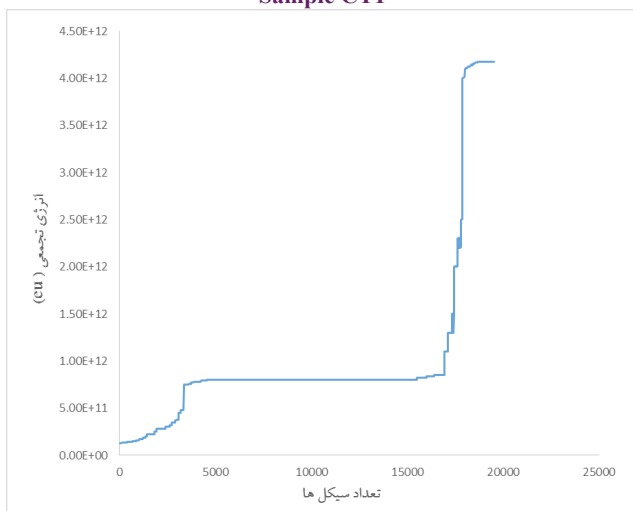
۴- تحلیل نتایج

پس از انجام تست‌های خستگی بر روی نمونه‌های تهیه شده در نسبت بارها و ضخامت‌های مختلف و اندازه‌گیری میزان انرژی نشر آوایی آزاد شده دو پارامتر مهم یعنی انرژی تجمعی و شمارش تجمعی بدست آمده به منظور تعیین رابطه بین طول ترک و انرژی نشر آوایی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت که نتایج آن در ادامه آورده شده است. یکی از پارامترهای مهم که می‌تواند در تحلیل وضعیت ترک در قطعه مورد استفاده قرار گیرد میزان انرژی تجمعی بوده که این پارامتر برابر با کلیه انرژی‌های آزاد شده تا لحظه مورد نظر می‌باشد. میزان این پارامتر برای چهار دسته مختلف تست در شکل‌های ۶ تا ۹ مشاهده می‌شود.



شکل ۶: نمودار انرژی لحظه‌ای و تجمعی نمونه CT1

Fig6: Diagram of Combined and Spontaneous Energy of Sample CT1



شکل ۷: نمودار انرژی تجمعی نمونه CT2

Fig7: Diagram of Combined Energy of Sample CT2

همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، تجهیزات بکار رفته برای داده‌برداری نشر آوایی شامل دستگاه اصلی داده‌برداری، پیش تقویت‌کننده‌ها، سنسور و کابل‌های اتصال می‌باشند. پیش تقویت‌کننده‌ها با تقویت سیگنال موجب افزایش نسبت سیگنال به نویز شده و دقت داده‌برداری را افزایش می‌دهند، همچنین کابل‌های مخصوص استفاده شده از نوع محافظ‌دار می‌باشند که موجب کاهش تاثیر نویزهای محیط بر روی نتایج می‌گردند. نمایی از تست‌های انجام شده و نحوه قرارگیری نمونه در دستگاه در شکل ۵ مشاهده می‌شود. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، پس از نصب فیکسچر و نمونه‌ها بر روی دستگاه خستگی محوری، سنسورهای نشر آوایی و اکتسنومتر بر روی قطعه کار قرار داده شده‌اند. برای جلوگیری از ایجاد نویز به دلیل سایش بین فک دستگاه و فیکسچر، پارچه‌ای از جنس کتان قرار داده شده و به دلیل ضربه ناگهانی سیستم بارگذاری نوسانی در ابتدای کار، داده‌برداری همزمان سیستم نشر آوایی پس از ۲۰ ثانیه انجام گرفت. بارگذاری نوسانی و داده‌برداری سیستم نشر آوایی برای سه دامنه و دو ضخامت مختلف (چهار دسته) صورت گرفته و هر کدام از آزمون‌ها پنج بار تکرار گردیده‌اند. میانگین نتایج مربوط به هر یک از دسته‌ها در جدول ۲ آورده شده است.



شکل ۵: نمایی از قطعه، فیکسچر، سنسورها و اکتسنومتر

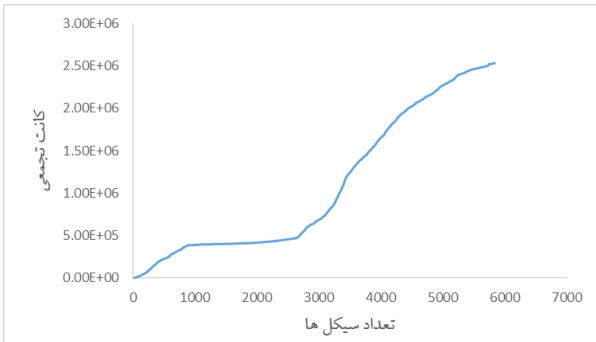
Fig5: Photos of text piece, fixture, sensors and extensometer

جدول ۲: اطلاعات نمونه‌ها و دامنه بارگذاری آن‌ها

Table2: Data of Samples and their loading Spectrum

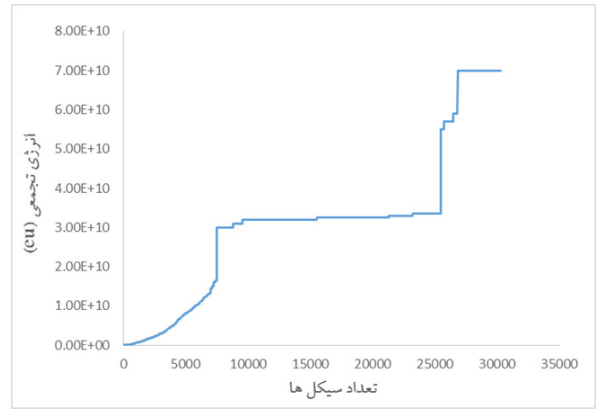
نمونه‌ها	ضخامت (mm)	کمینه بار (N)	بیشینه بار (N)
نمونه CT1	۱۵	۴۰۰۰	۴۰۰۰۰
نمونه CT2	۱۵	۳۰۰۰	۳۰۰۰۰
نمونه CT3	۱۵	۲۵۰۰	۲۵۰۰۰
نمونه CT4	۱۱	۲۵۰۰	۲۵۰۰۰

1 Shield



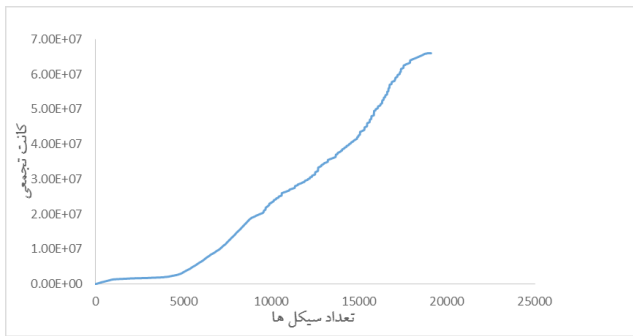
شکل ۱۰: نمودار شمارش تجمعی نمونه CT1

Fig10: Diagram of Combined Counting of Sample CT1



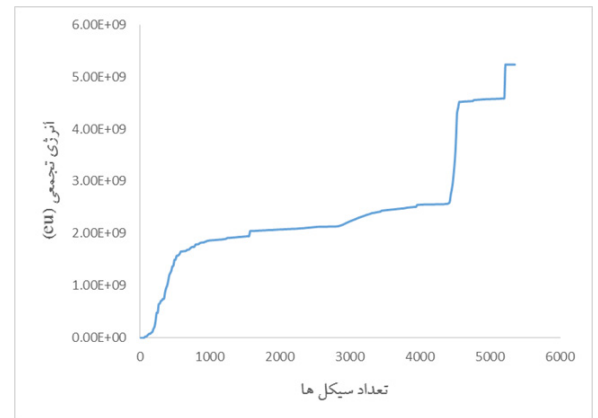
شکل ۸: نمودار انرژی تجمعی نمونه CT3

Fig8: Diagram of Combined Energy of Sample CT3



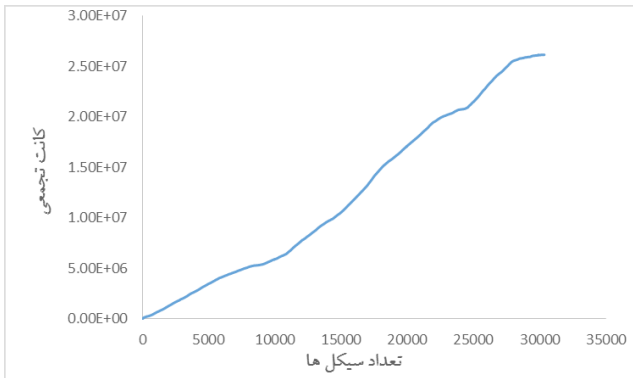
شکل ۱۱: نمودار شمارش تجمعی نمونه CT2

Fig11: Diagram of Combined Counting of Sample CT2



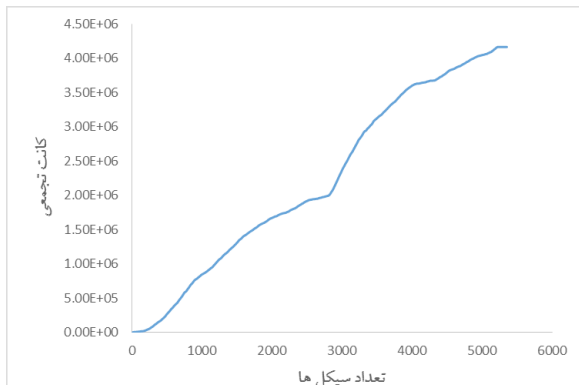
شکل ۹: نمودار انرژی تجمعی نمونه CT4

Fig9: Diagram of Combined Energy of Sample CT3



شکل ۱۲: نمودار شمارش تجمعی نمونه CT3

Fig12: Diagram of Combined Counting of Sample CT3



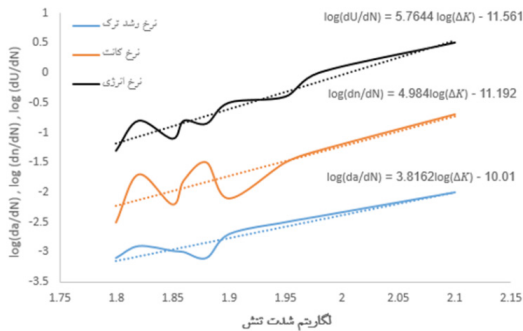
شکل ۱۳: نمودار شمارش تجمعی نمونه CT4

Fig13: Diagram of Combined Counting of Sample CT4

همانطور که در شکل‌های بالا مشاهده می‌شود، الگوی انرژی تجمعی با الگوی رشد ترک تطابق مناسبی دارد، این نمودار مشابه نمودار نرخ رشد ترک بر حسب سیکل، دارای سه ناحیه می‌باشد، و بیشتر آن در ناحیه دوم است که میزان افزایش انرژی بسیار اندک می‌باشد. این ناحیه مربوط به شکل‌گیری ناحیه پلاستیک و گسترش ترک در مکانیزم شکست انعطاف پذیر است که مدت زمان نسبتاً زیادی در این مرحله صرف می‌شود، به دنبال آن در ناحیه سوم شاهد رشد ناگهانی نمودار می‌باشیم که نشان دهنده آزاد شدن مقدار زیادی انرژی می‌باشد و مربوط به شکست کلیواژ (شکست ناگهانی) می‌باشد. همچنین همانطور که دیده می‌شود الگوی رفتاری برای کلیه حالت‌های بار گذاری و ضخامت‌های مختلف یکسان می‌باشد و بنابراین می‌توان از این پارامتر برای پیش‌بینی وضعیت قطعه پیش از رسیدن به حد بحرانی به خوبی استفاده نمود.

همانطور که در بخش دوم اشاره گردید، یکی دیگر از شاخص‌هایی که می‌توان برای تعیین وضعیت قطعه مورد استفاده قرار گیرد، نمودار شمارش تجمعی می‌باشد که میزان این شاخص برای نمونه‌های مختلف در شکل‌های ۱۰ تا ۱۳ نشان داده شده است. از این نمودار ها می‌توان برای پیش‌بینی طول ترک استفاده نمود.

خطی بین لگاریتم شدت تنش و لگاریتم‌های نرخ رشد ترک و نرخ انرژی آکوستیک و نرخ شمارش تجمعی وجود دارد (شکل‌های ۱۴ تا ۱۷).

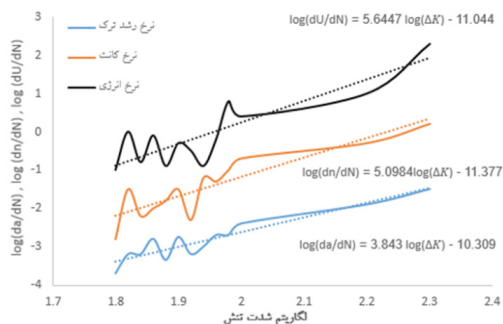


شکل ۱۴: نتایج تحلیل رگرسیون نرخ رشد ترک، نرخ انرژی و شمارش

تجمعی نمونه CT1

Fig14: Results of Regression Analysis of Crack Growth rate, Energy Rate, and Combined Counting of Sample CT1

همانطور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، نرخ رشد ترک، نرخ شمارش تجمعی و نرخ انرژی آزاد شده الگوی رفتار مشابهی بر حسب لگاریتم شدت تنش داشته و بنابراین از ثابت‌های به دست آمده می‌توان در تخمین طول ترک و عمر باقی‌مانده استفاده نمود. منحنی نرخ رشد ترک (da/dN) ، رفتار رشد ترک بر حسب میزان شدت تنش را بیان می‌نماید، رشد ترک بر اساس مقدار شدت تنش دارای سه مرحله می‌باشد: در مرحله اول میزان شدت تنش از حد آستانه برای شروع رشد ترک پایین‌تر بوده و رشد ترک بسیار اندک می‌باشد، در مرحله دوم که آن را مرحله پایدار نیز می‌نامند، میزان شدت تنش از مقدار آستانه بیشتر شده و ترک به تدریج رشد می‌نماید، نرخ رشد ترک و رفتار آن در این مرحله بصورت خطی بوده و بخش بیشتر عمر قطعه در این بخش می‌باشد، در مرحله سوم که مرحله ناپایدار می‌باشد رفتار ترک غیر خطی بوده و رشد ترک بسیار سریع رخ می‌دهد و به شکست فاجعه‌بار ختم می‌شود و بنابراین نقطه عبوری از مرحله دوم به سوم بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۳].



شکل ۱۵: نتایج تحلیل رگرسیون نرخ رشد ترک، نرخ انرژی و شمارش

تجمعی نمونه CT2

Fig15: Results of Regression Analysis of Crack Growth rate, Energy Rate, and Combined Counting of Sample CT2

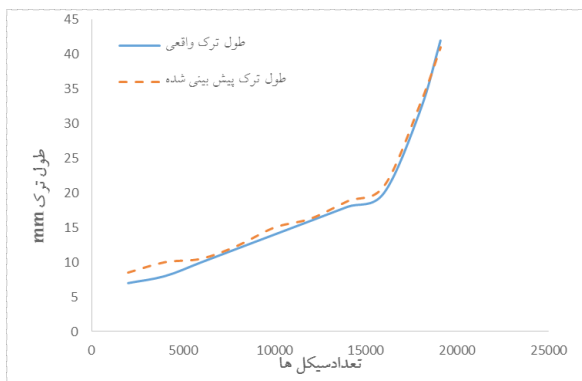
همانطور که در شکل‌های ۱۰ تا ۱۳ مشاهده می‌شود، مقدار شاخص شمارش تجمعی با تعداد سیکل‌ها بصورت پیوسته افزایش می‌یابد و در صورت داده‌برداری پیوسته از ابتدای عمر قطعه می‌توان با کمک این شاخص وضعیت ترک را برای نمونه مورد نظر مشخص نمود. با توجه به تشابه بین رفتار پارامترهای آکوستیک و نرخ رشد ترک با تعیین پارامترهای نشر آوایی و به کمک داده‌های آزمایشگاهی می‌توان رابطه میان این پارامترها با پارامترهای مکانیک شکست رامشخص نمود. برای این منظور و جهت یافتن ثابت‌های رشد ترک $(\log(C), m)$ و نشر آوایی $(\log(B_n), P_n, \log(B_e), p)$ از تحلیل رگرسیون خطی حداقل مربعات استفاده شده است. جدول ۳ نتایج مربوط به تحلیل رگرسیون را نشان می‌دهد.

جدول ۳: ثابت‌های رشد ترک و نشر آوایی

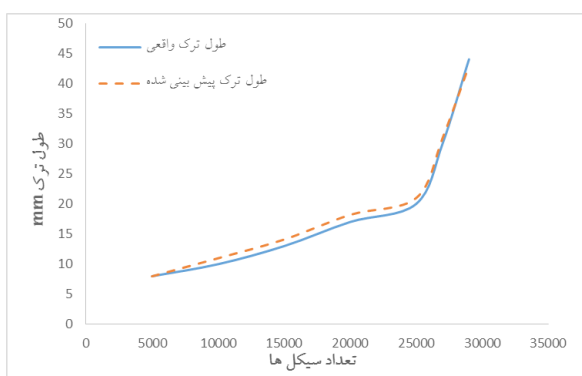
Table3: Coefficients of Crack Growth and Acoustics

قطعه	CT4	CT3	CT2	CT1	
ضخامت	۱۲ mm	۱۵ mm	۱۵ mm	۱۵ mm	
نسبت بار	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	
پارامترهای رشد ترک	m	۳/۷۷۲	۳/۸۴۳	۳/۸۱۶	
	Log(C)	-۹/۱۵۸	-۹/۵۵۳	-۱۱/۵۶	-۱۰/۰۱
	C	۶/۹e-۱۰	۲/۷e-۱۰	۲/۷e-۱۲	۹/۷e-۱۱
پارامترهای انرژی نشر آوایی	P	۵/۳۹۵	۵/۶۰۱	۵/۶۴۴	۵/۷۶۴
	Log(B _e)	-۱۰/۰۷	-۱۰/۴۹	-۱۱/۰۴	-۱۱/۵۶
	B _e	۸/۵e-۱۱	۳/۲e-۱۱	۹/۱e-۱۲	۲/۷e-۱۲
پارامترهای شمارش نشر آوایی	P _n	۴/۶۳۸	۵/۰۰۶	۵/۰۹۸	۴/۹۸۴
	Log(B _n)	-۱۰/۵۵	-۱۰/۵۷	-۱۱/۳۷۷	-۱۱/۱۹۲
	B _n	۲/۸e-۱۱	۲/۶e-۱۱	۴/۲e-۱۲	۶/۴e-۱۲

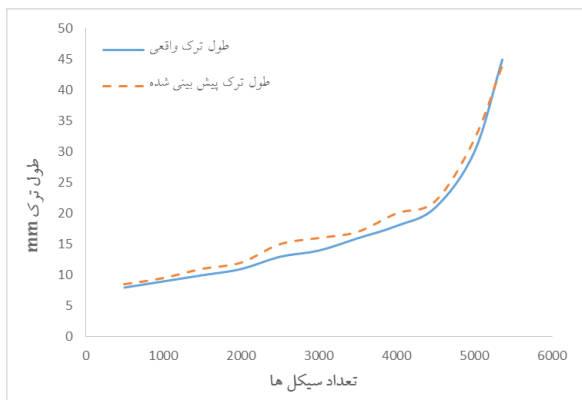
همانطور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، با استفاده از تحلیل رگرسیون خطی حداقل مجذورات، ثابت‌های رشد ترک و نشر آوایی به دست آمده است، نتایج حاصل از رگرسیون نشان می‌دهد که یک رابطه



شکل ۱۹: طول ترک واقعی و پیش‌بینی شده برای نمونه CT2
Fig19: Anticipated and Real Measures of Crack Length for Sample Piece CT2

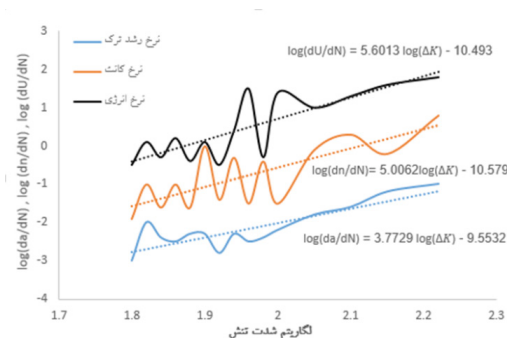


شکل ۲۰: طول ترک واقعی و پیش‌بینی شده برای نمونه CT3
Fig20: Anticipated and Real Measures of Crack Length for Sample Piece CT3

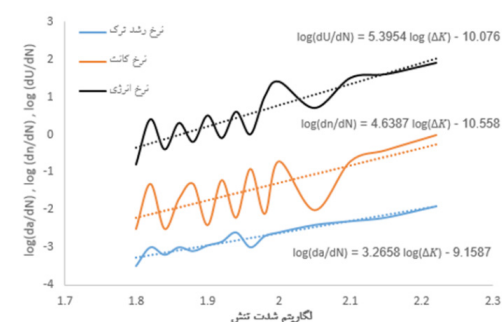


شکل ۲۱: طول ترک واقعی و پیش‌بینی شده برای نمونه CT4
Fig21: Anticipated and Real Measures of Crack Length for Sample Piece CT4

شکل‌های ۱۸ تا ۲۱ رشد ترک در ناحیه دوم (رشد پایدار) و شروع ناحیه سوم (رشد ناپایدار) را نشان می‌دهند. در این نواحی که اهمیت بالایی در پیش‌بینی عمر قطعه دارند میزان خطای حاصل از نتایج نشر آوایی کم بوده و می‌توان با دقت بالایی طول ترک را محاسبه نمود. همچنین مشاهده می‌شود که در بارگذاری‌ها و ضخامت‌های مختلف میزان اختلاف بین مقدار محاسبه شده برای طول ترک و مقدار واقعی

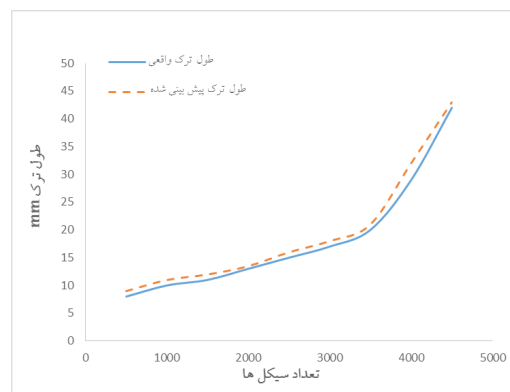


شکل ۱۶: نتایج تحلیل رگرسیون نرخ رشد ترک، نرخ انرژی و شمارش تجمعی نمونه CT3
Fig16: Results of Regression Analysis of Crack Growth rate, Energy Rate, and Combined Counting of Sample CT3



شکل ۱۷: نتایج تحلیل رگرسیون نرخ رشد ترک، نرخ انرژی و شمارش تجمعی نمونه CT4
Fig17: Results of Regression Analysis of Crack Growth rate, Energy Rate, and Combined Counting of Sample CT4

پس از به دست آوردن ثابت‌های مورد نیاز، پیش‌بینی طول ترک نمونه‌ها بر اساس داده‌های نشر آوایی و مقایسه آن با طول ترک واقعی صورت پذیرفت. با مقایسه نتایج به دست آمده، مشاهده گردید که پارامتر نرخ انرژی نسبت به شمارش تخمین دقیق‌تری را ارائه می‌دهد. در شکل‌های ۱۸ تا ۲۱ نمودار طول ترک بر اساس تعداد سیکل‌ها رسم شده و نتایج نشان‌دهنده اختلاف نسبتاً کم میان مقادیر محاسبه شده و نتایج واقعی می‌باشد.



شکل ۱۸: طول ترک واقعی و پیش‌بینی شده برای نمونه CT1
Fig18: Anticipated and Real Measures of Crack Length for Sample Piece CT1

تعداد نامشخصی ترک می‌باشد تهیه گردد.

فهرست علائم

علائم انگلیسی	
عرض نمونه (mm)	W
طول ترک (mm)	a
شدت تنش	$K\Delta$
انرژی شکست	J
مدول الاستیسیته (N/m^2)	E
فاکتور شدت تنش	
تعداد سیکل‌های بارگذاری	N
نرخ انرژی آزاد شده	G
جابجایی	
علائم یونانی	
نسبت طول ترک به عرض نمونه	α

منابع و مراجع

- [1] Ansari, F., Sensing issues in civil structural health monitoring. Vol. 10, Springer, 2005.
- [2] Wenzel, H., Health monitoring of bridges, John Wiley & Sons, 2008.
- [3] Rolfe, Theodore, S. and Barsom, J.M., Fracture and fatigue control in structures: Applications of fracture mechanics, ASTM International, 1977.
- [4] Miller, Ronnie K., and Paul McIntire. Nondestructive Testing Handbook. Vol. 5: Acoustic Emission Testing, American Society for Nondestructive Testing, Ohio, USA, 1987.
- [5] Mozahid, H., Acoustic Emission Source Characterization of Fatigue Crack Extension in Steel Bridge Material, MS Theses, Department of Civil and Environmental Engineering, University of South Carolina, Columbia, 2013.
- [6] Harris, D. O., and Dunegan, H. L., Continuous monitoring of fatigue-crack growth by acoustic-emission techniques, Journal of Experimental mechanics, Vol. 14(2), pp: 71-81, 1974.
- [7] Zachary, K., Walter, H., Steck, J., Crack Propagation

اندازه‌گیری شده بسیار کم می‌باشد که این امر نشان می‌دهد که نتایج روش نشر آوایی به بارگذاری و ضخامت وابستگی ندارد و می‌تواند برای حالت‌های مختلف بکار برده شود.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به بررسی ارتباط میان رشد ترک با انرژی سیگنال نشر آوایی پرداخته شده است. همانطور که در بخش تئوری تحقیق بیان شد با کمک پارامترهای انرژی تجمعی و شمارش تجمعی بدون نیاز به اطلاع از شدت تنش می‌توان به پیش‌بینی طول ترک و ارزیابی عمر باقی مانده در یک نمونه آزمایشگاهی پرداخته شود. برای استفاده از این داده‌ها بر روی سازه‌ها و سایر قطعات لازم است تا پارامترهای مربوط به رابطه نرخ رشد ترک و پارامترهای نشر آوایی به کمک داده‌های آزمایشگاهی تعیین شود که برای هر ماده مقادیر مشخصی است. بنابراین با توجه به هدف این مقاله که پایش وضعیت در پل‌های فلزی می‌باشد، به تعیین این ثابت‌ها برای ماده اس.تی ۵۲ پرداخته شد و با کمک رگرسیون خطی مقادیر مورد نیاز محاسبه گردید. مقایسه نتایج حاصل از محاسبات برای طول ترک با مقادیر حاصل از روش بازشدگی دهانه ترک (مقادیر واقعی) نشان می‌دهد که این روش از دقت مناسبی جهت پیش‌بینی طول ترک خستگی در این ماده برخوردار می‌باشد.

در این پژوهش تعدادی از پارامترهای نشر آوایی مورد مطالعه قرار گرفته و مناسب‌ترین روش برای تخمین عمر خستگی ارائه شده است. رفتار رشد ترک پیش‌بینی شده تطابق خوبی با نمونه‌های واقعی دارد که در زیر به آن اشاره می‌شود:

۱. مدل تئوری بررسی شده نه تنها برای نمونه‌های آزمایشگاهی، بلکه برای استفاده در آزمون‌های میدانی جهت ارزیابی عمر خستگی نیز می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

۲. پارامترهای نشر آوایی همچون انرژی تجمعی و شمارش تجمعی در ترکیب با معادلات استفاده شده، می‌تواند به عنوان هشداردهنده خطر در سازه فولادی زمانی که نقطه بحرانی ترک وارد مرحله ناپایدار می‌شود که نهایتاً منجر به شکست فاجعه بار می‌شود، به کار رود.

اگرچه این نتایج برای نمونه‌های آزمایشگاهی کششی فشرده بدست آمده که تنها شامل یک ترک مشخص می‌باشد ولی با توجه به یکسان بودن الگوی رفتاری ماده در شکست، می‌توان از نتایج این مطالعه به عنوان الگوی مناسب در پایش وضعیت یک پل فلزی با کمک نشر آوایی استفاده نمود. اگرچه به منظور دستیابی به نتایج دقیق‌تر لازم است که آزمایش‌هایی بر روی نمونه‌های واقعی صورت پذیرد و با کمک روش‌های آماری الگوهای دقیق‌تری برای حالت‌های واقعی که شامل

- sample geometry on acoustic emission generation during fatigue crack growth: Implications for structural health monitoring, *Journal of Fatigue*, Vol. 81, pp: 117-127, 2015.
- [14] Baram, J., and M. Rosen, Fatigue life prediction by distribution analysis of acoustic emission signals, *Journal of Materials Science and Engineering*, Vol. 41(1), pp: 25-30, 1979.
- [15] Lindley, T. C., Palmer, I. G. and Richards, C. E., Acoustic emission monitoring of fatigue crack growth, *Journal of Materials Science and Engineering*, Vol. 32(1), pp: 1-15, 1978.
- [16] Choi, J., Jyi-Jiin, L., and Daniel, I. M., Analysis of acoustic emission waveforms from propagating fatigue crack, *Proceedings of AIP Conference*, Vol. 509(1), 2000.
- [17] Yu, J., et al., Prediction of fatigue crack growth in steel bridge components using acoustic emission, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 67(8), pp: 1254-1260, 2011.
- [18] Roberts, T. M., and Talebzadeh, M., Fatigue life prediction based on crack propagation and acoustic emission count rates, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 59(6), pp: 679-694, 2003.
- [19] ASTM. Annual Book of ASTM Standard: section three-metals test methods and analytical procedures. ASTM International; 2006.
- [20] ASTM E647 Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates, 2006.
- Analysis Using Acoustic Emission Sensors for Structural Health Monitoring Systems, *Journal of The Scientific World*, Vol. 213, pp:13-17, 2013.
- [8] Masmoudi, S., Mahi, A. E., Turki, S., Fatigue behaviour and structural health monitoring by acoustic emission of E-glass/epoxy laminates with piezoelectric implant, *Journal of composite material*, Vol. 108, pp: 50-58, 2016.
- [9] Behnia, A., Chai, H. K., Shiotani, T., Advanced structural health monitoring of concrete structures with the aid of acoustic emission, *Journal of Construction and Building Materials*, Vol. 65, pp: 282-302, 2014.
- [10] Strantz, M., Hemelrijck, D. V., and et all, Acoustic emission monitoring of crack propagation in additively manufactured and conventional titanium components, *Journal of Mechanics Research Communications*, Vol. 84, pp:8-13, 2017.
- [11] Michalcová, L., Růžek, R., Fatigue test of an integrally stiffened panel: Prediction and crack growth monitoring using acoustic emission, *Journal of Procedia Structural Integrity*, Vol. 2, 2016.
- [12] Dykas, B., Harris, J., Acoustic emission characteristics of a single cylinder diesel generator at various loads and with a failing injector, *Journal of Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 93, pp: 397-414, 2017.
- [13] Gagar, D., Foote, P., Irving, P. E., Effects of loading and

