

## پیش بینی رشد ناپیوسته ترک خستگی در پلی اتلین با تراکم بالا بر اساس تئوری لایه

### ترک همراه با پارامتر های متغیر لایه ترک

#### چکیده

تئوری لایه ترک (CL) مزیت هایی از جمله در نظر گرفتن فیزیک رشد آهسته ترک (SCG) و شبیه سازی سناریو های مختلف SCG در ترموپلاستیک ها را به همراه دارد. با این وجود، فقدان دانش لازم که وابستگی پارامتر های ورودی CL را به شرایط بارگذاری و نیز محدودیت های زمانی استفاده از تئوری CL در پیش بینی طول ماندگاری مواد قرار گرفته در معرض شکستگی حاصل از تردی را مد نظر قرار دهد وجود دارد. در این مطالعه، تئوری CL با زون متوسط فرآیند (PZ) مرز کشش (rclose) و خصیصیات زمانی برای تخریب PZ (t) برای تست های خستگی در شرایط بارگذاری مختلف به منظور مشاهده SCG ناپیوسته مورد استفاده قرار گرفته است. با استفاده از شبیه سازی، نتایج آزمایشگاهی از طریق تغییر دو پارامتر CL حاصل شد و به موجب آن این دو پارامتر به عنوان فاکتور های کلیدی تاثیر گذار بر انواع مختلف بار های استفاده شده تعیین شد. بعلاوه روابط خاص بین این دو پارامتر و شرایط بارگذاری خستگی بدست آمده است. این روابط به دست آمده می تواند برای استفاده عملی از تئوری CL برای پیش بینی فرآیند های SCG و پیش بینی مدت ماندگاری آنها در شرایط مختلف خستگی مفید باشد.

#### مقدمه

اخیرا پلی اتلین با تراکم بالا (HDPE) به طور گسترده در لوله های توزیع آب و گاز مورد استفاده قرار گرفته اسن. طول مدت ماندگاری مورد انتظار برای لوله های HDPE در شرایط میدانی چندین دهه است (1). به دلیل فرآیند شکست طولانی مدت عناصر ساختاری ترموپلاستیک، آزمایشات تسریع شده در مجموعه های آزمایشگاهی به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است (2، 3). در اینجا، شرایط محیطی و بارگذاری ممکن است دستکاری شود تا تست های کوتاه مدت از طریق افزایش دما و بار فراتر از مقدار نرمال آنها اجرا شود (4-7). به طور خاص، بارگذاری

دوره ای برای تست سریع خزش مورد استفاده قرار گرفته است (8). در این آزمایشات بسیار حیاتی است که رابطه ی بین آزمایشات کوتاه مدت و فرآیند های شکست طولانی مدت از قبیل ارتباط بین خستگی و گسیختگی ناشی از تنش شناسایی شود. بدین منظور درکی جامع از مکانیسم گسیختگی تحت شرایط بار گذاری مختلف ضروری است. مکانیزم گسیختگی ترموپلاستیک های تحت خستگی از قبیل HDPE (1،9) به صورت تابعی از تنش استفاده شده ، نسبت تنش و فرکانس و نیز دما و محیط تغییر می کند. در شرایط بارگذاری نسبتا بالا که به عنوان شکست انعطاف پذیر شناخته می شو، زنجیره و ساختار ملکولی HDPE دستخوش شکستگی ها و تبلور مجدد می شود. با این حال تحت شرایط بار کمتر ، شکست نهایی می تواند به صورت شکست تردی بدون دفورمه شدن پلاستیک زیاد که اغلب در شکست لوله های HDPE در محل کار دیده می شود، رخ دهد. برای بدست آوردن نتایج ارزشمند، تغییر شرایط بارگذاری تست های تسریع شده باید مکانیزم های شکست مشابه با شکست های واقعی در عرصه را به همراه داشته باشد.

شکست تردی لوله های HDPE را می توان به طور رایج به سه مرحله در شرایط بارگذاری خستگی و خزش تقسیم کرد. در اولین مرحله، شکاف های ریز در نزدیکی شکاف هایی که از قبل وجود داشته رخ می دهد. زمانی که تخریب از یک سطح بحرانی خاص بالاتر رفت، یک ترک بزرگ شروع به ایجاد و پیشرفت می کند. در مرحله ی دوم، ترک به صورت شکننده از طریق یک فرآیند رشد ترک شبیه ایستا که تحت عنوان رشد آهسته شکاف (SCG) نیز شناخته می شود، به آهستگی پیشرفت می کند. در نهایت، در مرحله سوم، ناپایداری کلی منجر به شکست عظیم همراه با انتشار سریع ترک (rcp) می شود (10). در بسیاری از موارد شکست در عرصه میدانی، زمان SCG به عنوان بخش اصلی مدت ماندگاری SCG در نظر گرفته می شود. بنابراین، کدلسازی دقیق فرآیند SCG برای پیش بینی مدت ماندگاری HDPE بسیار حیاتی است. از این رو ، بساری از مطالعات برای ارزیابی فرآیند SCG مواد HDPE صورت گرفت است (2،3، 10-13). ظاهرا، SCG مواد HDPE به صورت پیوسته و ناپیوسته بسته به بار استفاده شده، دما و اندازه ترک ، اجرا شده است. تفاوت در الگو های SCG از طریق تفاوت معنی دار در کینتیک SCG حاصل می شود. نقطه ای که در آن مکانیزم و کینتیک SCG تغییر می کند به عنوان تبدیل نوع دوم شکننده- تردی (DBT2)

شناخته می‌شود زیرا به تبدیل شکست شکننده (خزش) به تردی میکروفیبرها در زون فرآیند (PZ) مربوط می‌شود (2، 9، 12، 14، 15).

مدل‌های تجربی زیادی برای نرخ SCG وجود دارد که مبتنی بر قانون پاریس هستند (16، 18). با این حال، این مدل‌های اصلاح شده هنوز نمی‌تواند به طور کامل حالت ناپیوسته SCG مواد HDPE را در نظر بگیرد. این موضوع را می‌توان از این امر مشاهده کرد که مدل‌های تجربی انحصاراً نیروی محرک ترک یعنی عامل شدت تنش را استفاده کرده‌اند و ارتباط متقابل بین ترک و PZ را در نظر نگرفته‌اند (10). مطالعات مورفولوژیکی و میکروساختاری بر روی ترک‌ها و PZ در جلوی صفحه‌ی ترک برای جبران کردن این کمبودها مورد نیاز است. تئوری لایه ترک (CL) اولین مدلی است که امکان استنتاج PZ به طور مستقل از ترک را فراهم می‌کند و به طور دقیق رابطه‌ی متقابل بین ترک اصلی و PZ (یعنی، تخریب در جلوی راس ترک) را مد نظر قرار می‌دهد. سیستم شامل ترک اصلی و PZ که راس ترک را در بر می‌گیرد، CI را به همراه دارد (19). در مورد مواد ترموپلاستیک مهندسی، نواحی کرنش محلی (تخریب) در اطراف راس ترک اصلی ممکن است علاوه بر حالت تنش، بسته به معماری ملکولی و مورفولوژی پلیمر نیز تغییر کند (20). پلی اتیلن (PE)، به طور خاص HDPE، نمایان‌گر نوع ساده‌ای از PZ گوه‌ای شکل است، که از فیبرهای کشش سرد و غشاها تشکیل شده و در آن مرز نسبتاً مشخص بین PZ و مواد اصلی اطراف وجود دارد. بنابراین، در این مورد، یک روش انطباق کاربردی است. این روش ساده‌سازی پارامترهای CL را ممکن می‌سازد (13، 21، 22). ویژگی‌های مورفولوژیک PZ و ترک را می‌توان برای ایجاد تئوری CL در جهت شبیه‌سازی رفتار SCG ترموپلاستیک‌های مختلف از قبیل HDPE به کار برد.

در حین شبیه‌سازی CL، پارامترهای مختلف منعکس‌کننده ویژگی‌های مواد، میکروساختار و شرایط تست استفاده شد از قبیل تنش نهایی عمل‌کننده بر روی مرز PZ، انرژی اولیه شکست سطح، انتقال انتالپی برای تبدیل مواد و نسبت کشش طبیعی. اگرچه هر کدام از پارامترهای CL یک مفهوم فیزیکی شفاف دارد، ارزیابی آزمایشگاهی هر کدام از پارامترها مورد نیاز است. بنابراین استفاده از تئوری CL برای پیش‌بینی طول مدت مواد ترموپلاستیک در شکست تردی تا حدودی با محدودیت روبرو است. یک راه موثر برای ارتقای کاربرد تئوری CL استفاده از یک آنالیز

سیستماتیک از روابط بین رفتار SCG و پارامتر های مختلف CL است. ارزیابی اثر دما که یکی از عوامل تسریع کننده است بر روی انتالپی کشش سرد ، یعنی تبدیل مواد از حالت ایزوتروپی اولیه به یک حالت با کشش دارای جهت گیری بالا ، انجام شد (9). با این حال، مطالعه بر روی پارامتر های CL نیز مورد نیاز است.

در این مطالعه، آنالیز پارامتری برای تخمین طول مدت دوام و حالت SCG شرایط میدانی از طریق ترکیب ترکیب تست های کوتاه مدت و شبیه سازی های عددی SCG و مدت دوام PE انجام شد. رفتار SCG مواد HDPE تحت شرایط بارگذاری خستگی به صورت عددی با استفاده از تئوری CL شبیه سازی شد. پارامتر های ورودی CL متغیر برای آنالیز پارامتری مد نظر قرار گرفت. نتایج آزمایشگاهی گزارش شده توسط پارسونز و همکاران (2، 12) با نتایج شبیه سازی ما مقایسه شد و وابستگی پارامتر CL به شرایط بارگذاری خستگی از قبیل سطح حداکثر بار، نسبت R، و فرکانس بارگذاری بررسی شد. به این دلیل که تئوری CI یک سیستم از دو معادله دیفرانسیلی جفت شده که تشریح کننده تغییر ترک و PZ است استفاده می کند، مشاهدات پدیدار شناسی استفاده شده در مطالعه حاضر را می توان به دیگر شرایط که مکانیزم برهمکنش بین ترک و PZ مشابه باشد، تعمیم داد. بنابراین، می توان به طور دقیق رفتار SCG و مدت دوام HDPE را در شرایط خستگی و بار گذاری خزش از طریق استفاده از الگوریتم CL ارائه شده در این مطالعه تخمین زد.

## 2. پیش زمینه ی تئوریک و شبیه سازی ها

### 1.2. استفاده از تئوری لایه ترک برای HDPE

CL سیستمی است شامل ترک اصلی و زون تخریب اطراف که اغلب تحت عنوان PZ شناخته می شود (23). مورفولوژیکی تیپیک PZ گوه شکل در HDPE در شکل 1 نشان داده شده است (13\_). افزایش شدت تخریب به صورت تابعی از زمان به شکل کاهش در انرژی شکست سطحی (SFE) بیان شده که به عنوان مقاومت در برابر انتشار ترک در نظر گرفته می شود. انتشار یک ترک اصلی از طریق PZ به وسیله ی رقابت بین نیروی محرک انتشار ترک و مقاومت مربوطه تعیین می شود.

نوک ترک و راس زون فرآیند را می توان در مورد HDPE به دلیل شکل خاص PZ آن تعریف کرد که در شکل 2 نشان داده شده است. زمانی که بار در منطقه ای دور تر از نوک ترک اعمال شود، PZ در جلوی نوک ترک ایجاد می شود و این نشان میدهد که PZ شدیداً کشیده شده را می توان به عنوان مواد تبدیل شده از HDPE تخریب نشده در نظر گرفت. تغییر انرژی پتانسیل در اثر چنین تبدیل هایی را می توان به صورت تغییر انرژی پتانسیل گیبس (G) بین مواد اولیه و PZ نشان داد (11، 23). تغییر انرژی پتانسیل گیبس در اثر حرکت PZ را می توان تحت شرایطی که PZ و مواد باقی مانده در دو فاز مجزا در نظر گرفته می شوند نیز محاسبه کرد. با این فرض، نیروی محرک رشد PZ ( $X^{PZ}$ ) را می توان به صورتی که در معادله 1 بیان شده است نشان داد. استفاده از این برای انتشار ترک، نیروی محرکه مربوطه ( $X^{CR}$ ) را می توان به صورت رابطه 2 بدست آورد. در اینجا، رشد ترک و PZ را می توان با استفاده از روابط خطی مناسب محاسبه کرد (21).

$$X^{PZ} = - \left. \frac{\delta G}{\delta l_{PZ}} \right|_{l_{CR} = \text{const.}} = J_1^{PZ} - \gamma^{tr} R_1, \quad (1)$$

$$X^{CR} = \left. \frac{\delta G}{\delta l_{CR}} \right|_{l_{PZ} = \text{const.}} = J_1^{CR} - 2\gamma, \quad (2)$$

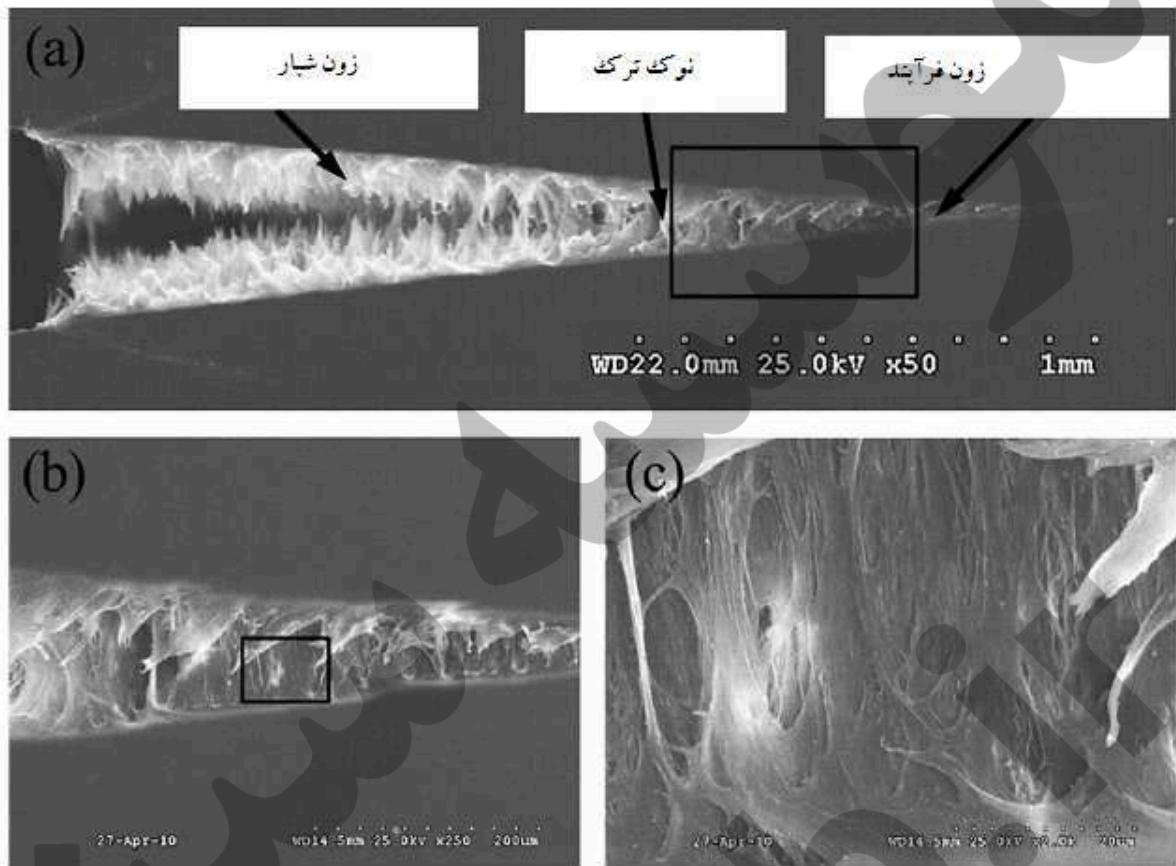
که در آن  $l_{CR}$  و  $l_{PZ}$  طول PZ و ترک و  $J_1^{CR}$  و  $J_1^{PZ}$  نرخ آزاد شدن انرژی (ERR) برای رشد PZ و ترک هستند.  $\gamma^{tr}$  تفاوت تراکم انتالپی بین مواد اولیه و مواد تغییر یافته هستند.  $R_1$  کمیت حجمی مواد تبدیل شده از مواد اولیه به PZ است. این معیاری از تفاوت با مدل دوگدال - بارنت بلیت (DB) بر اساس شرایطی است که در آن  $K_{tot} = C$  به معنی  $X^{PZ} = 0$  است (24، 25). چونکه این مدل ملزومات انتالپی برای مواد تغییر یافته به مواد PZ در هر واحد حجم را در نظر نمی گیرد،  $\gamma^{tr}$  چندین نتیجه دارد که نشان دهنده عدم دقت مدل DP برای مواردی از قبیل مواد پلیمری که اتلاف انرژی زیادی را به همراه دارند، است (13، 26).  $\gamma$  SFE مواد تغییر یافته است که در طول زمان تخریب شده اند. ارزشمند است که یادآوری شود که هر دو رابطه غیر خطی بوده و معادلات رشد PZ و ترک با

دیگری ترکیب شده و چندین درجه آزادی به همراه دارد. بنابراین، یک فرآیند حل عددی که بر اساس ویژگی های مشاهده شده PZ ساده سازی شده برای استفاده عملی از شبیه سازی CL مورد نیاز است.

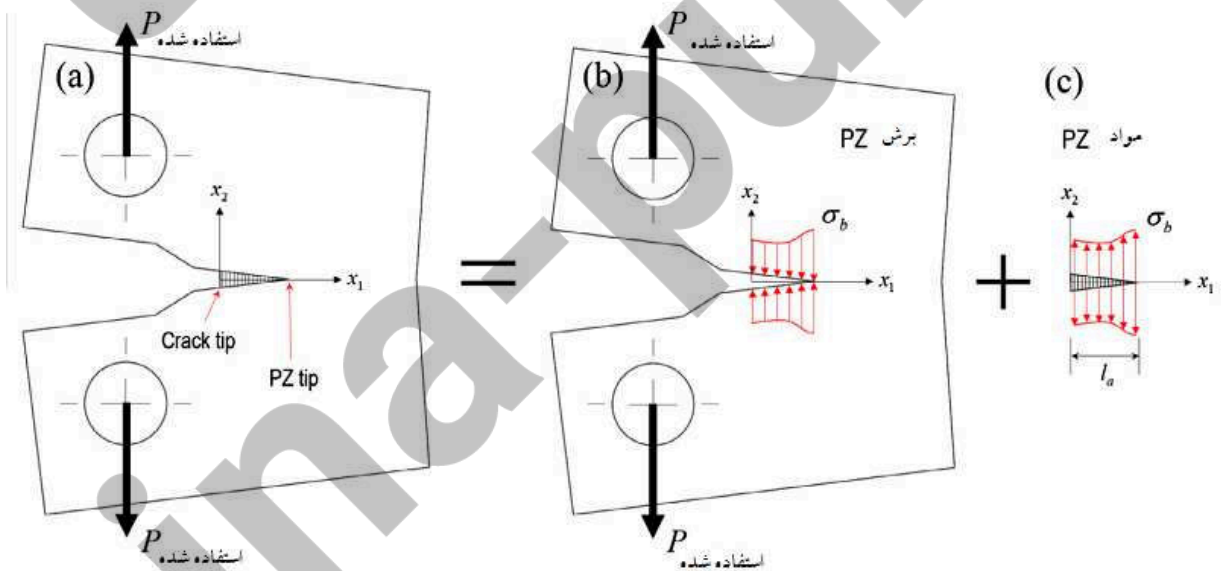
همانطور که در شکل 1 نشان داده شده است، HDPE یک شکل گوه ای باریک و ساده برای PZ را نشان میدهد و مواد PZ را می توان به عنوان همگن فاز دو یعنی پلیمر شدیداً کشیده شده در نظر گرفت. این ویژگی ها ساده سازی بیشتر مدل CL از طریق تعریف روش انطباق را تسریع می کند (11، 13، 21). در شکل 2، ماده مانع PZ را می توان به عنوان یک ماده الاستیک در نظر گرفت و کمیت مواد تغییر یافته با استفاده از نسبت کشش طبیعی ( $\lambda$ ) و جابجایی باز شونده ترک ( $\delta_{tot}$ ) در راس ترک محاسبه می شود. نیروی محرک ساده شده برای رشد PZ به صورت زیر است (13):

$$X^{PZ} = J_1^{PZ} - \gamma^{tr} R_1 = \frac{K_{tot}^2}{E'} - \frac{\gamma^{tr}}{\lambda - 1} \delta_{tot} |_{x=l_0} \quad (3)$$

که در آن  $K_{tot}$  و  $\delta_{tot}$  علامت اختصاری برای عامل شدت تنش (SIF) در نوک PZ و جابجایی باز شونده ترک (COD) در نوک ترک است و به وسیله ی استفاده از انطباق بار بیرونی و تنش مرزی پخش شده از نوک ترک به نوک PZ تعیین می شوند (شکل 2). بعلاوه  $E'$  مدول الاستیک در شرایط کرنش صفحه ای است.



شکل 1: شکل زون فرآیند (PZ) HDPE



شکل 2: شماتیک روش انطباق در نمونه CT (تنش مرز  $\sigma_b$  تابعی از محل،  $x_i$  و دیگر فاکتور هایی از قبیل شرایط بارگذاری و دما)

توزیع دقیق بار مرزی باید به طور شفاف مشخص شود. کشش مرزی واقعی ممکن است به تنش خمشی ( $\sigma_y$ ) و تنش کششی ( $\sigma_{dr}$ ) ربط داشته باشد و نشان دهنده وابستگی نرخ کشش مرزی PZ است. برای تسهیل مدلسازی، توزیع کشش مرزی را میتوان به عنوان تنش بستار مقدار میانگین تنش مرزی  $\sigma_{close}$  که از تنش کششی بیشتر است (11) در نظر گرفت. تنش بستار را می توان به صورت میانگین تنش مرزی اعمال شده در اطراف PZ ( یعنی متوسط  $\sigma_b$  نشان داده شده در شکل 2) محاسبه کرد. در حقیقت، تنش بستار ویژگی ماده نیست و با ژئومتری، شرایط بار و دما تغییر می کند. بنابراین توضیح دادن تاثیر این شرایط بر روی  $\sigma_{close}$  حیاتی است.

ساده سازی بیشتر شبیه سازی های CI با استفاده از HDPE را می توان با پرداختن به انرژی شکست سطحی (SFE) صورت داد. همانطور که در شکل 1 دیده می شود، مواد تبدیل شده در PZ ویژگی های شدیداً رشته ای شده را نشان میدهد و می توان آن را به عنوان ماده ای همگن و ناهمسانگرد که دارای تخریب مکانیکی است در نظر گرفت. بنابراین یک مدل برای تخریب SFE را می توان برای کل مواد AZ همگن به صورت رابطه ی 4 که در زیر دیده می شود استفاده کرد (3):

$$\gamma = \gamma_0 \frac{1}{1 + \left(\frac{t}{R}\right)^n} \quad (4)$$

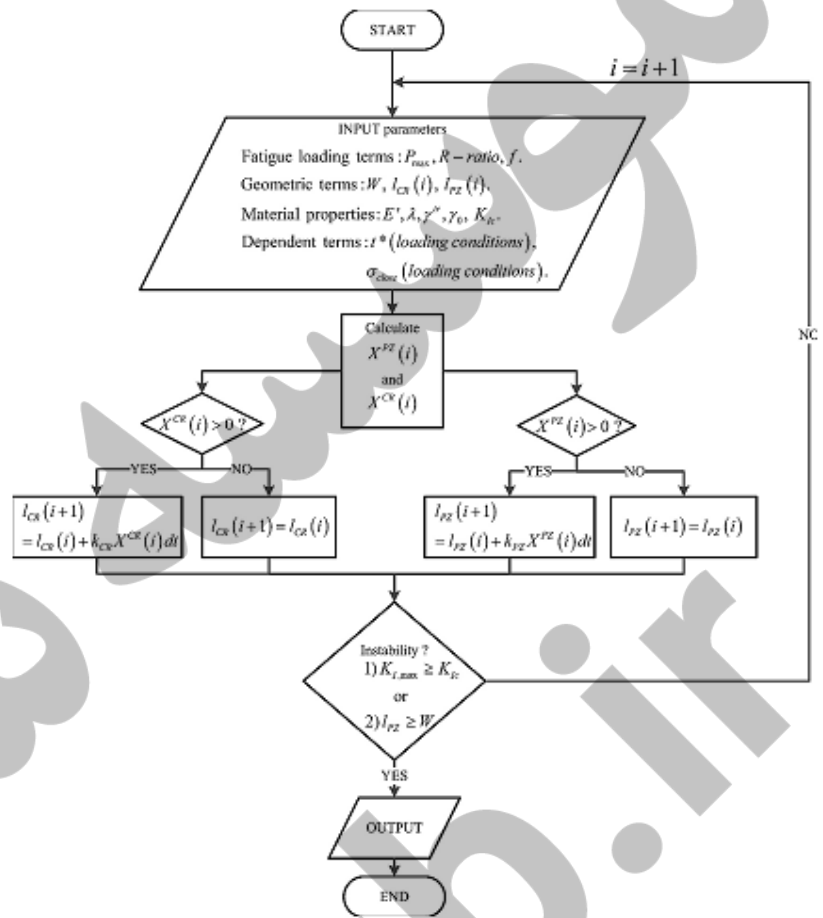
که در آن  $\gamma_0$  SFE ماده اولیه و  $t_i$  زمان گذشته از شروع تخریب ماده است.  $t^*$  زمان مشخص برای تخریب و R عامل برازش دهنده مثبت است. همانطور که در رابطه ی 4 دیده می شود، SFE به صورت تابعی از زمان تخریب کاهش پیدا می کند و  $t^*$  سرعت تخریب SFE را کنترل می کند. سرعت تخریب SFE همچنین به شرایط بارگذاری بستگی دارد. آن برابر است با مقدار  $t^*$  که می تواند در شرایط بارگذاری خستگی و نیز  $\sigma_{close}$  تغییر یابد. درک تاثیر شرایط بارگذاری خزش و خستگی در تنش بستار و زمان مخصوص و شناسایی رابطه ی بین آنها اهداف اولیه این تحقیق است.



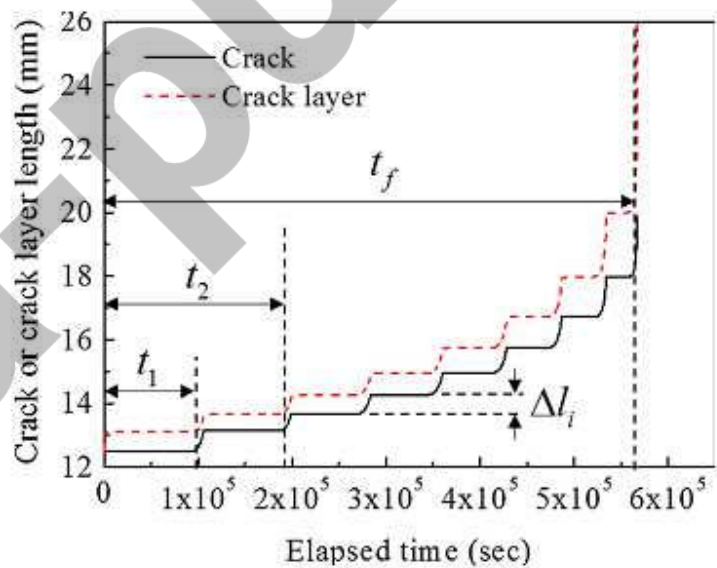
بر اساس شرح تئوری CI برای HDPE ، یک شبیه سازی عددی با استفاده از نرم افزار متلب برنامه نویسی شده و الگوریتم برنامه در شکل 3 نشان داده شده است. برای تایید نقش شرایط بار گذاری شکست شامل نسبت R، مقیاس بار استفاده شده و فرکانس بارگذاری در  $t^*$  و  $\sigma_{close}$  ، شبیه سازی های SCG ناپیوسته با نتایج آزمایشگاهی تجربی بدست آمده از مطالعات پارسونس و همکاران (2،12) مقایسه شد. 13 نتیجه تجربی با مقدار متغیر از  $K_{I,max}$  و مقادیر نسبت R همراه با فرکانس بار 1 هر تزی و چهار نتیجه برای تغییر فرکانس همراه با مقدار ثابت  $K_{I,max}$  و نسبت R استفاده شد. بارهای دوره ای سینوسی برای تست های خستگی استفاده شد. این آزمایشات سطوح شکست را به وسیله ی خط بندی پیوسته و مدت مانده به جهش های مراحل اول و دوم ( $t_1$ ;  $t_2$ ) و زمان نهایی شکست ( $t_f$ ) آشکار ساخت. مقیاس بار استفاده شده در شرایط خستگی مبتنی بود بر حداکثر بار استفاده شده تا قابلیت کاربرد از مدل یکسان حتی با استفاده از یک بار کاملاً معکوس ( $R = -1$ ) نیز حاصل شود. یک کشش فشرده (CT) بر روی نمونه مشابه کشش استفاده شده در نمونه های آزمایشگاهی در شبیه سازی CL استفاده شد. از آزمایشاتی که نشان دهنده رشد مرحله ای ترک است، نتایج تست برای طول جهش ( $\Delta l_i$ ) و زمان تا جهش ( $t_1, t_2, t_f$ ) با استفاده از شبیه سازی های CL منطبق شد که در شکل 4 نشان داده شده است و در آن فقط  $t^*$  و  $\sigma_{close}$  متفاوت بود. دو معیار شکست شبیه سازی CL در این مطالعه استفاده شد. اولین نقطه ای بود که در آن  $K_I$  در نوک ترک از مقدار سفتی شکست مواد HDPE ( $K_{I,C}$ ) بیشتر می شود. در این مورد، شکست سریع رخ داد. دومی نقطه ای بود که در آن تمامی لیگامنت های باقی مانده به مواد PZ تبدیل شد. تحت این شرایط ، مواد PZ شبیه یک مفصل یا لولای پلاستیک عمل کرده و نمونه CT به وسیله ی درجه بالای چرخش تعیین ویژگی می شود.

بر اساس شرح تئوری CI برای HDPE ، یک شبیه سازی عددی با استفاده از نرم افزار متلب برنامه نویسی شده و الگوریتم برنامه در شکل 3 نشان داده شده است. برای تایید نقش شرایط بار گذاری شکست شامل نسبت R، مقیاس بار استفاده شده و فرکانس بارگذاری در  $t^*$  و  $\sigma_{close}$  ، شبیه سازی های SCG ناپیوسته با نتایج آزمایشگاهی تجربی بدست آمده از مطالعات پارسونس و همکاران (2،12) مقایسه شد. 13 نتیجه تجربی با مقدار متغیر از  $K_{I,max}$  و مقادیر نسبت R همراه با فرکانس بار 1 هر تزی و چهار نتیجه برای تغییر فرکانس همراه با مقدار ثابت

$K_{I,max}$  و نسبت R استفاده شد. بارهای دوره ای سینوسی برای تست های خستگی استفاده شد. این آزمایشات سطوح شکست را به وسیله ی خط بندی پیوسته و مدت مانده به جهش های مراحل اول و دوم ( $t_1$ ;  $t_2$ ) و زمان نهایی شکست ( $t_f$ ) آشکار ساخت. مقیاس بار استفاده شده در شرایط خستگی مبتنی بود بر حداکثر بار استفاده شده تا قابلیت کاربرد از مدل یکسان حتی با استفاده از یک بار کاملا معکوس ( $R = -1$ ) نیز حاصل شود. یک کشش فشرده (CT) بر روی نمونه مشابه کشش استفاده شده در نمونه های آزمایشگاهی در شبیه سازی CL استفاده شد. از آزمایشاتی که نشان دهنده رشد مرحله ای ترک است، نتایج تست برای طول جهش ( $\Delta l_i$ ) و زمان تا جهش ( $t_1, t_2, t_f$ ) با استفاده از شبیه سازی های CL منطبق شد که در شکل 4 نشان داده شده است و در آن فقط  $t^*$  و  $\sigma_{close}$  متفاوت بود. دو معیار شکست شبیه سازی CL در این مطالعه استفاده شد. اولین نقطه ای بود که در آن  $K_I$  در نوک ترک از مقدار سفتی شکست مواد HDPE ( $K_{I,c}$ ) بیشتر می شود. در این مورد، شکست سریع رخ داد. دومی نقطه ای بود که در آن تمامی لیگامنت های باقی مانده به مواد PZ تبدیل شد. تحت این شرایط، مواد PZ شبیه یک مفصل یا لولای پلاستیک عمل کرده و نمونه CT به وسیله ی درجه بالای چرخش تعیین ویژگی می شود.



شکل 3: الگوریتم شبیه سازی عددی SCg مواد HDPE بر اساس تئوری CI

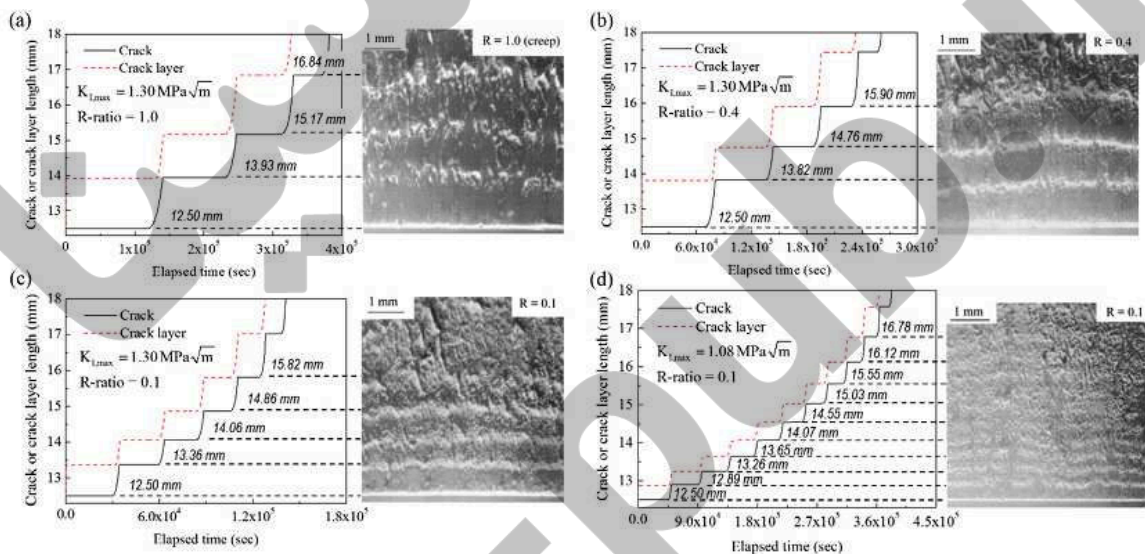


شکل 4: تعریف زمان انکوباسیون ( $t_1, t_2$ ) و طول متغیر ترک برای رفتار ناپیوسته SCG مواد HDPE

## 3. نتایج و بحث

## 1.3. مقایسه شبیه سازی و نتایج آزمایش

نتایج تجربی شرایط مختلف بارگذاری خستگی شامل سطح شکست، با تغییر فقط  $t^*$  و  $\sigma_{close}$  تکثیر شد. شکل 5 نتایج آزمایش (2) و شبیه سازی با مقادیر مختلف  $K_{I,max}$  و  $R$ -ratio در فرکانس بارگذاری ثابت 1 هرتزی را نشان می دهد. تمای طول گام ها به مقادیر هم ارز آزمایشگاهی خود برآزش داده شدند. زمان لازم برای جهش گام شبیه سازی CL نیز مشابه با زمان بدست آمده در آزمایشات بود که در جدول 1 نشان داده شده است.



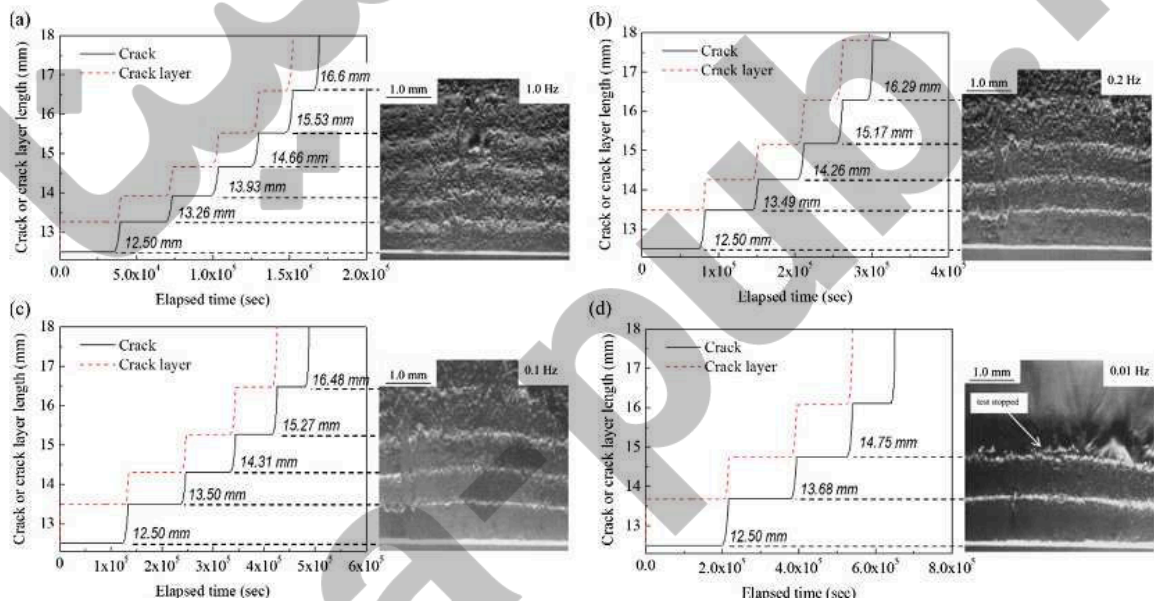
شکل 5: رشد ناپیوسته آهسته ترک (SCG) بدست آمده از شبیه سازی لایه ترک و سطح شکست مربوط به  $K_{I,max}$  و نسبت  $R$  مختلف، نشان دهنده شبیه سازی خوب منطبق با آزمایشات است.

جدول 1: نتایج آزمایشی و شبیه سازی زمان تا اولین و دومین جهش و زمان شکست در  $K_{I,max}$  و نسبت های  $R$  متغیر در یک فرکانس ثابت. نتایج آزمایشی از رفرنس (2) گرفته شده است.

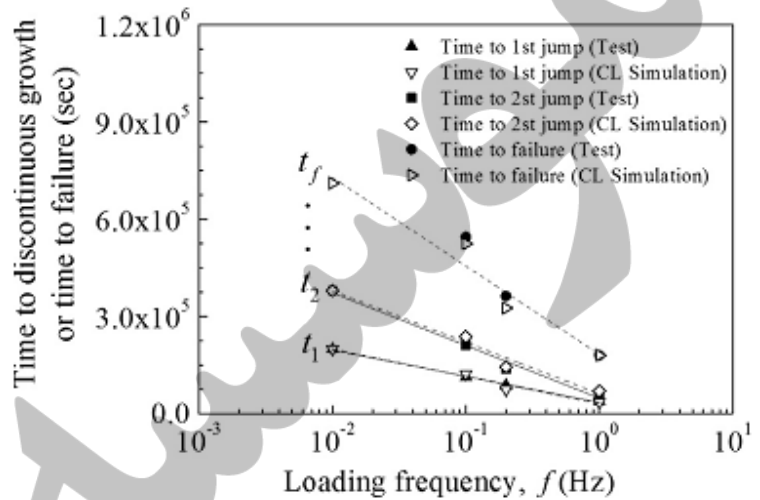
R-ratio	$K_{I,max}$ (MPa $\sqrt{m}$ )	Experimental $t_1$ ( $10^3$ s)	CL simulation $t_1$ ( $10^3$ s)	Experimental $t_2$ ( $10^3$ s)	CL simulation $t_2$ ( $10^3$ s)	Experimental $t_f$ ( $10^3$ s)	CL simulation $t_f$ ( $10^3$ s)
0.1	1.30	32 ± 2	30.2	58 ± 2	59.59	153 ± 19	146.7
0.4	1.30	70 ± 7	69.9	138 ± 11	135.3	264 ± 35	261.9
0.8	1.30	94 ± 2	98.8	176 ± 2	188.2	383 ± 34	340.6
1.0	1.30	135 ± 21	120.2	220 ± 14	231.7	403 ± 52	382.7
0.1	1.08	48 ± 4	45.8	85 ± 7	91.4	386 ± 34	396.8
0.32	1.08	98 ± 15	95.6	169 ± 15	188.2	590 ± 32	567.7
0.5	1.08	123 ± 16	127.2	213 ± 38	249.2	660 ± 55	659.0
1.0	1.08	168 ± 11	191.1	278 ± 4	370.0	864 ± 61	698.2
0.2	1.43	33 ± 3	30.2	60 ± 7	58.5	135 ± 2	134.9
0.3	1.30	54 ± 16	52.1	103 ± 18	102.5	228 ± 32	230.2
0.5	1.13	121 ± 8	106.1	196 ± 8	208.2	570 ± 3	581.0
1.0	0.85	421 ± 30	382.6	701 ± 2	741.9	2055 ± 290	1860
0.22	1.17	64 ± 4	57.7	114 ± 8	114.0	297 ± 25	338.8

Loading frequency,  $f = 1$  Hz.

شکل 6 مقایسه بین سطوح شکست آزمایشات و سطوح شکست شبیه سازی شده در چهار فرکانس بارگذاری مختلف (0.01, 0.1, 0.2, 1 Hz) را نشان میدهد. شکل 7 زمان تا جهش گام بدست آمده از نتایج شبیه سازی و آزمایش را نشان میدهد. نسبت R و  $K_{I,max}$  ثابت و برابر با 0.1 و  $1.30 \text{ MPa} \sqrt{m}$  بود. طول گام های ناپیوسته و زمان تا جهش گام شبیه سازی ها با نتایج آزمایش همسویی خوبی داشت.



شکل 6: رشد ناپیوسته آهسته ترک (SCG) بدست آمده از شبیه سازی لایه ترک و سطح شکست مربوطه در فرکانس های مختلف (a) 0.01, (b) 0.1, (c) 0.2 و (d) 1 Hz نشان دهنده شبیه سازی مناسب همسو با آزمایشات است. نسبت R و  $K_{I,max}$  برابر با 0.1 و  $30.1 \text{ MPa} \sqrt{m}^{0.5}$  بود.

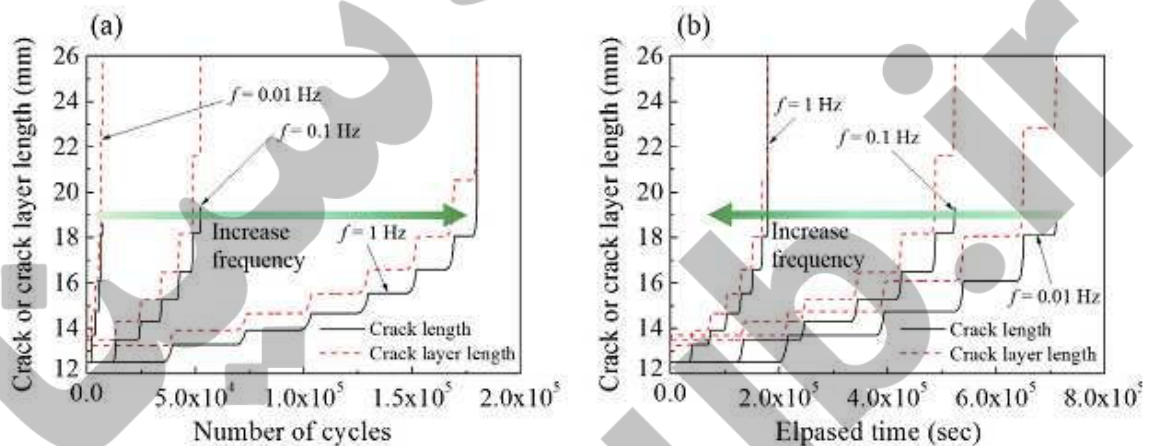


شکل 7: نتایج آزمایشگاهی و شبیه سازی زمان تا اولین و دومین جهش و زمان تا شکست برای فرکانس های مختلف در مقدار ثابت  $K_{lmax}$  و نسبت R ثابت.

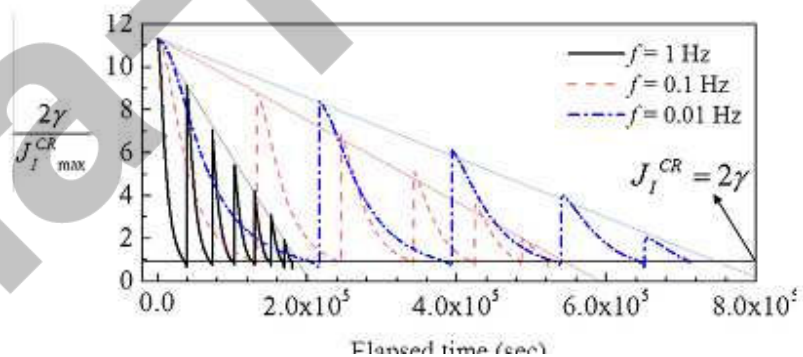
کل فرآیند SCG ناپیوسته و تخریب انرژی شکست سطحی ( $2\gamma$ ) به ترتیب در شکل 8 و 9 برای فرکانس های بار 1، 0.1 و 0.01 هرتز نشان داده شده است. زمانی که نرخ آزادسازی انرژی در نوک ترک ( $J_1^{CR}$ ) از  $2\gamma$  بزرگتر است، یک ترک اصلی شروع به ایجاد می کند که نشان دهنده نیروی محرک ترک مثبت ( $X^{CF}$ ) است. بعد از اینکه ترک از طریق مواد PZ به اندازه کافی تخریب شده منتشر شد، نوک ترک وارد مواد دست نخورده شده که انرژی شکست سطحی اولیه ی ( $2\gamma_0$ ) دارند می شود و دوباره زمانی که مواد به اندازه کافی تخریب شدند متوقف می شود تا مقدار مثبت  $X^{CR}$  بدست آید. جهش های ناگهانی در شکل 9 با جهش های ترک هم سو بود در حالیکه تخریب های تدریجی با زمان متوقف شدن ترک مرتبط است. بنابراین، هر چه مسیر انتشار ترک افزایش یابد  $J_1^{CR}$  در نقطه ی انتهایی هر ترک افزایش می یابد و از این رو زمان لازم برای تخریب به صورت تابعی از انتشار ترک کاهش می یابد. این نشان دهنده مفهوم SCG ناپیوسته است. همانطور که مشهور است، افزایش در فرکانس بار منجر به افزایش مدت دوام شکست بر حسب تعداد سیکل ها می شود (27). بر عکس، زمانی که زمان شکست حاصل شد، افزایش فرکانس

منجر به کاهش مدت دوام می شود (28). آن خصوصیات به خوبی در شکل 8 (a) و (b) همراه با رفتار کاملا ناپیوسته ی SCG نشان داده شده است که نشان دهنده اعتبار روش CL است.

این نشان می دهد که شبیه سازی CI برای تمامی فرآیندهای SCG ناپیوسته و برآورد مدت دوام در شرایط مختلف خستگی و خزش همراه با مقیاس بار، نسبت R و فرکانس های بارگذاری مختلف کاربردی است. تست های خزش (  $R = 1.0$  ) نیز با استفاده از روش شبیه سازی مشابه به طور موثر شبیه سازی شد. بعلاوه، نتایج مطلوب تشکیل شده نشان داد که دو پارامتر  $t^*$  و  $\sigma_{close}$  برای شبیه سازی دقیق روش SCG و طول مدت دوام در شرایط بارگذاری خزش و دوره ای است.



شکل 8: ترک و انشار لایه ترک در فرکانس های خستگی مختلف ( $f = 1, 0.1, 0.01$  Hz)، (a) طول ترک و لایه ترک با تعداد سیکل ها و (b) طول ترک و لایه ی ترک با زمان



شکل 9: تغییر انرژی شکست سطحی نرمال شده با نرخ انرژی آزاد شده در راس ترک در فرکانس های مختلف

### 2.3. تغییر پارامترها در شرایط بارگذاری خستگی

#### 1.2.3. زمان مشخص ( $t^*$ )

همانطور که بیان شد  $t^*$  سرعت تخریب مواد PZ را کنترل می کند. چونکه محیط تهاجمی در مطالعه ی حاضر در نظر رگرفته نشد، مکانیزم های تخریب در ابتدا توسط تخریب مکانیکی حاصل از خستگی و خزش ایجاد شد. زیرا فرکانس های استفاده شده به طور موثری کمتر مساوی 1 هرتز است، گرمایش محلی هیستریک در نظر گرفته نشد. در خصوص شرایط خستگی به خوبی دیده شده که بارهای زیاد و نسبت های R کم، نشان دهنده نوسانات زیاد تنش است و طول دوام خستگی را کاهش می دهد (2). بعلاوه، یک فرکانس بالاتر منجر به کاهش طول مدت دوام بر حسب زمان و نه تعداد سیکل ها می شود (12). فاکتورهای تاثیر گذار بر نرخ تخریب، به همان نسبت،  $K_{I,max}$ ، نسبت R و فرکانس بار استفاده شده هستند.

شکل 10 نشان دهنده نوسانات  $t^*$  با نسبت R و  $K_{I,max}$  در فرکانس 1 هرتزی را نشان می دهد. این نمودار سطحی نشان دهنده وضعیت فوق است. در یک نسبت R مشخص، افزایش در  $K_{I,max}$  منجر به کاهش  $t^*$  نشان دهنده تخریب سریع تر SFE است. به طور مشابه، کاهش در نسبت R در یک  $K_{I,max}$  مشخص، که با افزایش در مقدار نوسانات بار مرتبط است، منتج به کاهش  $t^*$  به مفهوم یکسان می شود. حین خزش، در حالتی که در آن نسبت R مقداری برابر با 1 دارد،  $t^*$  نیز با افزایش بار استفاده شده کاهش می یابد.

معادله برازش سطحی به صورت زیر است. نوسانات  $t^*$  با  $K_{I,max}$  و نسبت R با استفاده از یک معادله دوبعدی درجه دوم به خوبی برازش داده شد.

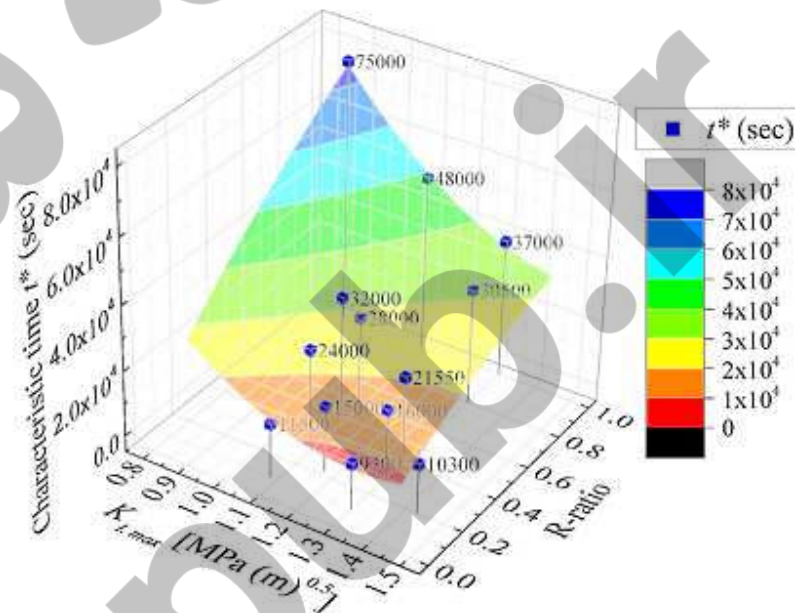
$$t^*(K_{I,max}, R) = 158,900 - 242,400K_{I,max} + 105,900R + 94,220K_{I,max}^2 - 13,960R^2 - 45,580K_{I,max}R \quad (5)$$



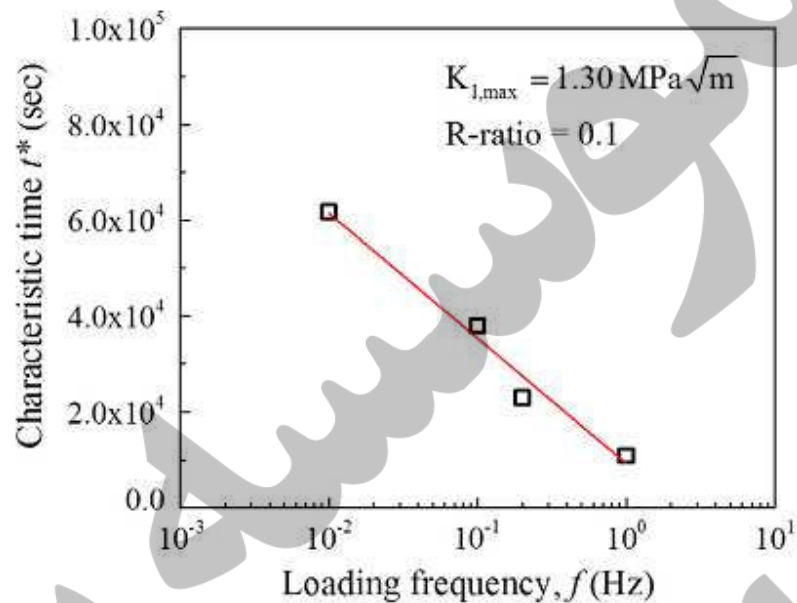
شکل 11 نشان دهنده تغییر  $t^*$  در اثر تغییرات فرکانس بار را نشان میدهد. زمانی که بار خستگی با فرکانس بالا استفاده می شود کاهش SFE از طریق تخریب مکانیکی تسریع شده و به صورت کاهش  $t^*$  نشان داده می شود. از شکل 11، می توان مشاهده کرد که نسبت معکوس بین  $t^*$  و لگاریتم مقیاس فرکانس به صورت زیر وجود دارد.

$$t^* \sim \log\left(\frac{1}{f}\right) \quad (6)$$

معادلات 5 و 6 را می توان به عنوان ابزار های عملی برای تخمین مقدار  $t^*$  در هر دامنه ی منطقی خستگی عناصر ساختاری HDPE استفاده کرد.



شکل 10: تغییرت زمان مشخص  $t^*$  با  $K_{I,max}$  و نسبت R در فرکانس 1 هرتز.



شکل 11: زمان مشخص  $t$  با فرکانس بارگذاری  $f$  ( واحد  $f$  هرتز است ).

### 2.2.3 تنش پیوستار ( $\sigma_{close}$ )

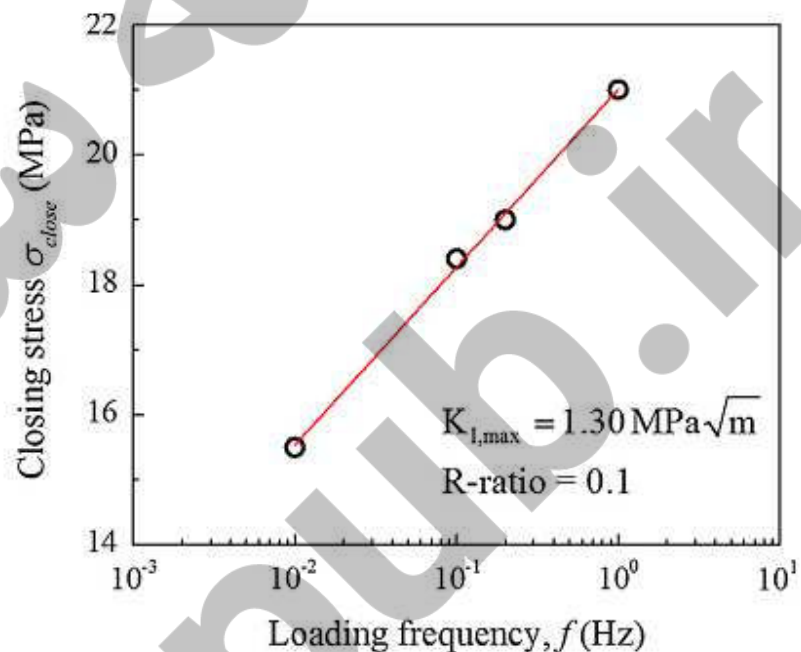
مشابه با  $t^*$ ، متوسط کشش مرزی  $\sigma_{close}$  با شرایط آزمایش از قبیل نوع نمونه، دما و بارگذاری خستگی تغییر می کند. فرآیند کشش مواد AZ ویژگی از فرآیند کشش سرد مشاهده شده در تست های کشش است (29، 30). بنابراین، رفتار  $\sigma_{close}$  در پاسخ به بارهای بیرونی را می توان به صورت قابل قیاس با رفتار کشش ترموپلاستیک ها در نظر گرفت. این بدین معنی است که  $\sigma_{close}$  را می توان به عنوان یک پارامتر قابل تعدیل بر اساس شرایط بارگذاری استفاده شده خصوصا نرخ کرنش، در نظر گرفت. به خوبی دیده شده که مواد HDPE وابستگی به نرخ کرنش مشابه با پلیمر های رایج بروز می دهند (31، 32).

به دلیل ماهیت ویسکوالاستیک HDPE، توزیه کشش مرزی کل ممکن است با افزایش نرخ کرنش افزایش یابد. پذیرفته شده است که فرکانس زیاد در تست های خستگی منتج به اثری مشابه با افزایش نرخ کرنش بر روی نمونه ها می شود (27، 33). این همچنین نشان دهنده افزایش تنش خمشی، تنش کششی و کاهش کمانش است. بعلاوه، مدلسازی نرخ کرنش در ریز شکاف های نزدیک راس ترک نشان داده است که نرخ کرنش با فرکانس خستگی مرتبط

است (12). بنابراین می توان به طور منطقی فرض کرد که  $\sigma_{close}$  با افزایش فرکانس بار استفاده شده، افزایش می یابد. این رفتار به خوبی در شکل 12 نشان داده شده است. همانطور که مورد انتظار است،  $\sigma_{close}$  با افزایش فرکانس افزایش می یابد. رابطه بدست آمده بین  $\sigma_{close}$  و فرکانس به صورت زیر است:

$$\sigma_{close} \sim \log(f) \quad (7)$$

همچنین یک رابطه ی خطی بین  $\sigma_{close}$  و  $F$  لگاریتمی وجود دارد به شرطی که فرکانس  $f$  به طور لگاریتمی در هر دوی  $\sigma_{close}$  و  $f^*$  نقش داشته باشد.



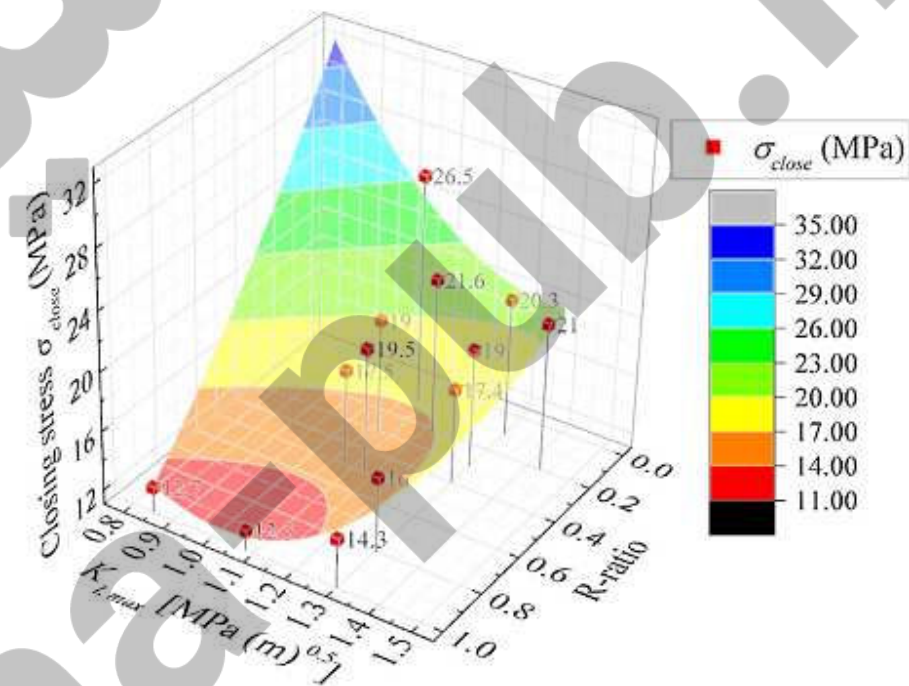
شکل 12: تنش بستار با فرکانس بارگذاری  $f$

شکل 13 ترسیم سه بعدی  $\sigma_{close}$  را به صورت تابعی از  $K_{I,max}$  و نسبت  $R$  در فرکانس 1 هرتزی نشان میدهد. هیچ رابطه ی محکمی بین  $\sigma_{close}$  و  $K_{I,max}$  در نسبت  $R$  ثابت وجود ندارد. این وابستگی از طریق تغییر مقادیر نسبت  $R$ ، تغییر می کند. به نظر  $\sigma_{close}$  با نسبت  $R$  رابطه ی نزدیک تری دارد. این تمایلات به طور واضح در شکل 14 و بخشی از شکل دو بهدی شکل 13 نشان داده شده است. در یک نسبت  $R$  معین، تغییر تنش بستاری یک روند نا

همسو با  $K_{I,max}$  را نشان می دهد. با این وجود، در یک  $K_{I,max}$  معین، تنش بستار روندی همسو با نسبت  $R$  دارد. این نشان می دهد که تنش بستار، تنش مرزی متوسط فیبریل در PZ، در حقیقت با نوسانات نرمال شده بار که با استفاده از نسبت  $R$  بیان می شود، ارتباط دارد. فرکانس تشریح شده و وابستگی نسبت  $R$  برای نرخ کرنش فیبریل ها همسو با یک مدل پیشنهاد شده دیگر است (12). رابطه ی برازش سه بعدی  $\sigma_{close}(K_{I,max}, R - \text{ratio})$  به صورت زیر بدست می آید:

$$\sigma_{close}(K_{I,max}, R) = 106.6 - 116.9K_{I,max} - 59.43R + 40.28K_{I,max}^2 + 6.232R^2 + 34.93K_{I,max}R \quad (8)$$

از چهار رابطه ی بالا،  $\sigma_{close}(K_{I,max}, R)$ ،  $t^*(K_{I,max}, R)$ ،  $t^*(f)$  و  $\sigma_{close}(f)$ ، برآورد طول مدت دوام در طولانی مد و رفتار SCG مواد HDPE در شرایط میدانی ممکن می شود.



شکل 13: نوسانات تنش بستار با  $K_{I,max}$  و نسبت  $R$  در فرکانس 1 هرتز.

4. نتیجه گیری

چونکه تئوری CL پارامتر های ورودی مختلفی دارد، استفاده از آن مشکل است. در این مطالعه شرایط خستگی و خزش SCG در HDPE با استفاده از تئوری CL به خوبی شبیه سازی شد و با نتایج آزمایشگاهی همسویی خوبی داشت. طول گام و زمان تا جهش های گام از طریق کنترل متوسط کشش مرزی PZ ( $\sigma_{close}$ ) و زمان مشخص ( $t^*$ ) برای تخریب ماده به خوبی برآزش داده شد. از دو پارامتر، چهار رابطه ی مفید یعنی  $t^*(K_{1,max}, R)$ ,  $t^*(f)$ ,  $\sigma_{close}(K_{1,max}, R)$ ,  $\sigma_{close}(f)$  بدست آمد که به خوبی با مفاهیم فیزیکی ارائه شده مرتبط است.

این مقاله سه نکته مطلوب برای کاربرد عملی از تئوری CL برای رفتار SCG در HDPE را نشان می دهد. اولین این است که این مقاله از طریق نشان دادن شبیه سازی دقیق SCG مواد HDPE در اثر تغییر مناسب مکانیزم شکست یعنی رفتار پیوسته و ناپیوسته SCG، قابلیت کاربرد وسیع تئوری CI برای شرایط بارگذاری مختلف را نشان می دهد. دوم اینکه، برای شرایط بارگذاری خستگی مختلف، داده های آزمایشگاهی از طریق تغییر ساده دو پارامتر CL یعنی زمان مشخص و تنش بستار، به راحتی تکثیر و باز تولید می شوند. این دو پارامتر، پارامتر هایی از CI هستند که عوامل کلیدی برای شبیه سازی موثر HDPE تحت شرایط خزش و خستگی هستند. سرانجام، الگوی SCG و طول مدت دوام بارگذاری های خزش و خستگی مختلف با استفاده از تئوری CI و از طریق چهار معادله ارائه شده، شبیه سازی می شود. این یافته ها می تواند برای مهندسان در طراحی مواد ترموپلاستیک سودمند باشد.