

Fracture Mechanisms of Particulate Filled Polymers

Soheyl Khajehpour-Tadavani¹ and Ismaeil Ghasemi^{*2}

1. Department of Polymerization Engineering, Faculty of Engineering,

2. Department of Plastics, Faculty of Processing;

Iran Polymer and Petrochemical Institute, P.O. Box 14975-112, Tehran, Iran

Received: 4 August 2019, accepted: 16 November 2019

Abstract

Extensive efforts have been made by scientists and researchers in polymer science to understand the mechanism underlying the failure of polymer materials. Complex behavior of polymeric materials compared to other conventional materials (metals and ceramics) makes it difficult to study this behavior. The fracture of polymeric materials, which is classified into brittle or ductile, also depends on the mechanism governing their fracture. From the material science point of view, the fracture mechanics of polymer materials discusses the relationships and equations that govern fracture. These relationships lead to a deeper understanding and obtain the values of stress concentration, criteria, and modes of fracture and express their relationship to the stress intensity index. However, from the point of view of polymer science, not only the mechanics of fracture, but also the mechanisms governing fracture are of great importance. The three mechanisms of cracking, shear yielding and cavitation are described as the mechanisms governing the fracture of polymeric materials. Understanding which mechanism governs a polymer piece requires a thorough understanding of that piece as well as the operating conditions. In this paper, the mechanics of fracture and the mechanisms that govern it are discussed, as well as how to transfer the mechanism to another one.

Key Words

fracture,
brittle and ductile fractures,
crazing,
shear yielding,
fracture toughness

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: i.ghasemi@ippi.ac.ir

سازوکارهای شکست پلیمرهای پر شده با ذرات

سهیل خواجه پور تادوانی^۱، اسماعیل قاسمی^{۲*}
 تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، صندوق پستی ۱۱۲-۱۴۷۹۵،
 ۱- پژوهشکده مهندسی، گروه مهندسی پلیمریزاسیون،
 ۲- پژوهشکده فرایند، گروه پلاستیک

دریافت: ۱۳۹۸/۵/۱۳، پذیرش: ۱۳۹۸/۸/۲۵

تلاش‌های گسترده‌ای برای درک سازوکار حاکم بر شکست مواد پلیمری توسط دانشمندان و پژوهشگران علم پلیمر انجام شده است. رفتار پیچیده مواد پلیمری در مقایسه با سایر مواد مرسوم (فلزات و سرامیک‌ها) بررسی این رفتار را با مشکل مواجه می‌کند. شکست مواد پلیمری که به صورت شکست ترد یا چکش‌خوار تقسیم‌بندی می‌شود، به سازوکار حاکم بر شکست آن‌ها نیز وابسته است. از دیدگاه علم مواد، مکانیک شکست مواد پلیمری پیرامون روابط و معادله‌های حاکم بر شکست بحث می‌کند. این روابط سبب درک عمیق‌تر و به دست آوردن مقادیر تمرکز تنش و معیارها و حالت‌های چقرمگی شکست می‌شود و ارتباط آن‌ها را با ضریب شدت تنش بیان می‌کند. این در حالی است که از دیدگاه علم پلیمر، نه تنها مکانیک شکست، بلکه سازوکارهای حاکم بر شکست نیز از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. سه سازوکار ترکچه‌زایی، تسلیم برشی و حفره‌زایی را به عنوان سازوکارهای حاکم بر شکست مواد پلیمری بیان می‌کنند. درک اینکه کدام سازوکار بر یک قطعه پلیمری حاکم است، نیازمند شناخت کامل آن قطعه و همچنین شرایط کارکرد است. در این مقاله، مکانیک حاکم بر شکست و سازوکارهای حاکم بر آن بحث می‌شود و نحوه چگونگی انتقال سازوکاری به سازوکار دیگر نیز بررسی می‌شود.

بسیارش
 فصلنامه علمی
 سال دهم، شماره ۱
 صفحه ۴۶-۳۸، ۱۳۹۹
 ISSN: 2252-0449

چکیده



سهیل خواجه پور تادوانی



اسماعیل قاسمی

واژگان کلیدی

شکست،
 شکست‌های ترد و چکش‌خوار،
 ترکچه‌زایی،
 تسلیم برشی،
 چقرمگی شکست

کاربردهای زیاد مواد پلیمری سبب شده است، استفاده از آن‌ها به‌طور بسیار گسترده افزایش یابد. با توجه به اینکه این مواد به‌عنوان اصلی‌ترین جایگزین فلزات در نظر گرفته می‌شوند و کاربردهای بسیار متنوعی در صنایع مختلف دارند، درک و استنباط اینکه چه اتفاقی رخ می‌دهد تا یک جسم پلیمری دچار شکست شود و همچنین سازوکار چگونگی شکست این دسته از مواد، از اهمیت زیادی برخوردار است.

شکست ماده پلیمری یا به‌شکل ترد یا به‌صورت چکش‌خوار انجام می‌شود. زمانی که شکست به‌صورت چکش‌خوار است، نشانه‌ها و مشخصه‌هایی از شکست در جسم پلیمری به‌وجود می‌آید، کمی جریان می‌یابد و دچار یک تغییر شکل می‌شود. بنابراین می‌توان پیش‌گویی کرد، این ماده پس از مدت زمانی خواهد شکست. در واقع، تنش تسلیم در نمودار تنش- کرنش مواد پلیمری جایی است که ماده پلیمری جریان می‌یابد و دچار تغییر شکل می‌شود. در این حالت، باید به یک تنش حداکثری برسد تا شکست نهایی اتفاق بیفتد. اما در نقطه مقابل، پلیمرهایی وجود دارند که وقتی تحت تنش قرار می‌گیرند، رفتار تنش- کرنش آن‌ها کاملاً خطی است. هنگامی که کرنش به مقدار مشخصی می‌رسد، این پلیمرها قابلیت جریان یافتن را ندارند و دچار شکست نهایی می‌شوند که موسوم به شکست ترد است. تمایل به شکست چکش‌خوار بیشتر است تا بتوان علامت‌های مشخصه ماده را دید و جایگزینی برای آن مشخص کرد. برای مثال، پلی‌استیرن پلیمری کاملاً بی‌شکل، شفاف و شکننده است و دچار شکست ترد می‌شود. ولی، زمانی که به آن یک افزودنی نظیر ذرات لاستیک اضافه می‌شود، رفتار شکست آن دچار تغییر شده و به‌صورت چکش‌خوار شکسته می‌شود. در واقع، پلی‌استیرن تبدیل به پلی‌استیرن مقاوم به ضربه (HIPS) می‌شود که ذرات لاستیک در آن پخش شده است. به‌وجود آمدن ترکچه در یک جسم پلیمری خود نوعی سازوکار میرایی (damping) انرژی است. زمانی که نیرویی به جسم پلیمری وارد می‌شود، دو نوع مصرف انرژی برای شروع و رشد ترک مشاهده می‌شود. اگر انرژی بیش از انرژی شروع ترک باشد، ترک به‌وجود می‌آید. اگر انرژی بیش از انرژی رشد ترک باشد، جسم می‌شکند. در اجسام پلیمری ممکن است در حین کاربرد یا ساخت، نقص به‌وجود آید. این نقص‌ها به‌عنوان نقاط تمرکز تنش عمل می‌کنند [۱، ۲].

مکانیک شکست

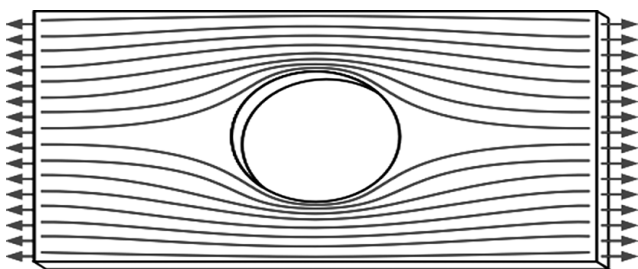
در صورت اعمال تنش به یک جسم پلیمری که ساختار پیوسته و

بی‌نقصی داشته باشد، تنش به‌طور یکنواخت توزیع می‌شود. اگر جسم دارای ناپیوستگی هندسی (geometrical discontinuity) یا نقص باشد، تنش به محض اعمال، روی دیواره‌های ناپیوستگی متمرکز می‌شود. اگر قرار باشد شکست اتفاق بیفتد، شروع و رشد این شکست از همین نقطه است. به‌طور کلی، عوامل متعددی وجود دارند که باعث شکست ماده پلیمری می‌شوند. مثلاً در یک بازه زمانی کوتاه، اگر نیروی زیادی اعمال شود، به طوری که زنجیر پلیمر اجازه رهایی از تنش و آسودگی نیابد، در چنین حالتی چون زمان اعمال تنش کم است، اگر جسم پلیمری حالت لاستیکی هم داشته باشد، دچار شکست ترد می‌شود. اگر جسم پلیمری طی مدت زمان زیادی تحت تنش قرار گیرد، مانند آزمون‌های خزش یا تنش- آسایش که در آن‌ها به‌طور تناوبی تنش اعمال می‌شود، باعث ایجاد خستگی در جسم پلیمری شده و در انتها شکست رخ می‌دهد. شکست ایجادشده به نوع تنش اعمالی به جسم (یک‌محوری، دو‌محوری یا سه‌محوری) و همچنین به نوع ناپیوستگی موجود در جسم بستگی دارد. به دلیل تمرکز تنش بر دیواره‌های یک جسم پلیمری دارای ناپیوستگی، ممکن است تنش به مقدار 10 MPa به جسم اعمال شود، ولی با توجه به ناپیوستگی موجود در آن، مقدار تنش اعمالی 15 MPa را نشان دهد. همچنین، ناپیوستگی می‌تواند از روی سطح جسم شروع شود و داخل توده ماده نباشد. ناپیوستگی درون توده ماده می‌تواند ذره ناخالصی باشد. بنابراین، مفهوم تمرکز تنش بسیار پراهمیت است [۳-۴].

درون تمام مواد، دارای ناپیوستگی هندسی است و در اطراف این ناپیوستگی افزایش تنش به‌وجود می‌آید. اثر تمرکز تنش به سبب توزیع مجدد خطوط نیروی انتقال‌یافته از درون جسم، زمانی ایجاد می‌شود که به ناپیوستگی می‌رسند. مطابق شکل ۱، گوشه‌ها، حفره‌ها، شکاف‌ها و بریدگی‌ها می‌توانند سبب ایجاد اثر تمرکز تنش شوند.

بزرگی و اندازه تمرکز تنش در نقص با معادله (۱)، معیار Inglis بیان می‌شود که Inglis در سال ۱۹۱۳ به‌دست آورد [۵، ۶]:

$$\sigma_c = \sigma(1+2(a/r)^{0.5}) \quad (1)$$



شکل ۱- تمرکز تنش [۱].

معادله (۳) به حالت زیر تبدیل می‌شود [۱]:

$$\frac{\partial}{\partial a}(W-U) > 2\gamma B \quad (6)$$

در مفاهیم مکانیک شکست، جمله 2γ با پارامتر G_c جایگزین می‌شود. در نهایت به معادله (۷) می‌رسیم [۱]:

$$\frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial a}(W-U) > G_c \quad (7)$$

G_c خاصیتی از ماده است که به‌عنوان معیاری از چقرمگی بیان می‌شود. این پارامتر را سرعت انتشار انرژی کرنش بحرانی یا نیروی گسترش ترک می‌نامند. G_c نیروی مورد نیاز اثرگذاری است که ترک را در یک جسم افزایش می‌دهد و با واحد J/m^2 بیان می‌شود. معادله (۷) را به شکل کاربردی‌تر می‌توان نوشت. جسمی را با ضخامت B در نظر بگیرید که تحت نیروی F قرار گرفته است. با به‌کارگیری معادله (۶)، استفاده از معادله اختلاف انرژی کشسان خطی ذخیره‌شده در این جسم، پیش و پس از گسترش ترک (∂U) با نیروی از قانون هوک و در نقطه‌ای دور از ترک، همچنین استفاده از معادله کار انجام‌شده در جسم به‌واسطه گسترش ترک (∂W) و وجود پارامتر تن‌دهی (C , compliance)، معادله (۷) به شکل زیر تبدیل می‌شود [۱]:

$$G_c = \frac{F_c^2}{2B} \left(\frac{\partial C}{\partial a} \right) \quad (8)$$

F_c نیروی اعمال شده برای شکست است.

نگرش دیگری نیز برای بررسی شکست پلیمرها وجود دارد که اساس آن، کشسانی غیرخطی است. در این نگرش، فرض بر این است، جسمی که هیچ گونه ترکی ندارد، انرژی کرنش یکنواختی در واحد حجم دارد که آن را با U_0 نشان می‌دهند. حال، چنانچه این جسم دارای ترک باشد، این انرژی در مساحتی که ترک ایجاد شده است، به صفر کاهش می‌یابد. این مساحت با ka^2 نشان داده می‌شود که در آن، k ثابت تناسب است. بنابراین، انرژی کشسانی اتلافی به‌واسطه ایجاد ترک به شکل زیر نمایش داده می‌شود [۱]:

$$-U = ka^2 BU_0 \quad (9)$$

$$-\frac{\partial U}{\partial a} = 2kaBU_0 \quad (10)$$

در این معادله، σ_c تنش واردشده به محل ناپیوستگی، σ بیانگر تنش اسمی، $2a$ اندازه نقص و r شعاع نقص (شعاع نوک ترک) است. σ_c را با σ_{max} نیز نمایش می‌دهند. بنابراین، معادله (۱) را به صورت زیر نیز می‌توان نوشت [۱، ۵، ۶]:

$$K(t) = \sigma_{max} / \sigma_{nominal} \quad (2)$$

عبارت $1+2(a/r)^{0.5}$ را ضریب تمرکز تنش می‌نامند و آن را با $K(t)$ نشان می‌دهند. ضریب تمرکز تنش به هندسه نقص وابسته است. هرچه مقدار شعاع نوک ترک کمتر باشد، ترک تیزتر می‌شود و مقدار عددی $K(t)$ افزایش می‌یابد. در مقابل، اگر بزرگی شعاع نوک ترک زیاد باشد، ترک لبه‌ضخیم (blunt crack) می‌شود. در این حالت، مقدار عددی $K(t)$ نسبت به نقص تیز، کمتر است. نقص‌های نوک‌تیز از نوع لبه‌ضخیم خطرناک‌تر هستند. در حالت حدی، اگر مقدار شعاع نقص به ترک، به سمت صفر میل کند، به ضریب تمرکز تنش بسیار زیاد منجر می‌شود و به بی‌نهایت میل می‌کند.

از نقطه نظر انرژی، زمانی که نیرویی به جسمی اعمال می‌شود، به واسطه اعمال آن نیرو کاری در جسم انجام می‌شود. این کار برابر با مجموع انرژی کشسان درونی و انرژی لازم برای ایجاد سطوح جدید از راه ایجاد ترکچه و انتشار ترک است. بنابراین، تغییر شکل یادشده و ایجاد سطح جدید، خود نوعی سازوکار اتلاف انرژی است. سازوکار اصلی شکست در یک جسم پلیمری ابتدا توسط Griffith پیشنهاد شد. می‌توان مفاهیم را به‌صورت زیر بیان کرد [۱]:

$$\frac{\partial}{\partial a}(W-U) > \gamma \frac{\partial A}{\partial a} \quad (3)$$

در این معادله، I سطح بررسی‌شده و γ انرژی سطحی بر واحد سطح است. در حالتی که نیروی اعمال‌شده سبب انجام کاری نشده و تغییری در ابعاد جسم حاصل نشود، کار انجام‌شده صفر خواهد بود و معادله (۳) به شکل زیر بیان می‌شود [۱]:

$$\frac{\partial U}{\partial a} > \gamma \frac{\partial A}{\partial a} \quad (4)$$

حال، اگر ترکچه در جسم که دارای ضخامتی به اندازه B است، گسترده شود [۱]:

$$2B\partial a = \partial A \quad (5)$$

G و K بسته به اینکه جسم تحت کدام یک از نیروها (حالت‌ها) قرار گیرد، با زیروند مربوط مشخص می‌شود [۵،۶].
با استفاده از مفاهیم مکانیک شکست کشسان خطی (LEFM) که George R. Irwin در سال ۱۹۵۷ میلادی ارائه داد، پارامتری با عنوان ضریب شدت تنش (K_I) مطرح شد [۱]:

$$K_I = \sigma_c (\pi a)^{1/2} \quad (16)$$

با جاگذاری معادله (۱۶) در معادله (۱۴) خواهیم داشت [۱]:

$$G_c E = K_I^2 \quad (17)$$

زمانی که K_I با K_{Ic} برابر شود، G_c مقدار بحرانی انرژی کرنش آزادشده در ماده را برای گسترش ترک و حتی شکست جسم نشان می‌دهد. ارتباط بین G و K_I با اهمیت است. زیرا رسیدن به K_{Ic} به معنی شرایطی است که ترک شروع به رشد می‌کند [۲،۷].

بنابراین، چنانچه نیروی F بر جسم پلیمری یا هر جسم دیگری اعمال شود که دارای نقصی با اندازه $2a$ است، بیشترین مقدار تنش در نوک نقص متمرکز می‌شود. بیشینه مقدار تنش در جهتی ظاهر می‌شود که 90° (برای تنش‌های عمودی) و 45° (برای تنش‌های برشی) با جهت اعمال نیرو فرق داشته باشد. بیشترین مقدار تنش در نوک ترک متمرکز است. هر قدر از ترک دور می‌شویم، تنش کمتر می‌شود. ترک از جاهایی آغاز می‌شود که نقص وجود دارد. به محض اعمال نیرو، نیرو در نواحی دارای پیوستگی به سرعت منتقل می‌شود و نقاطی که ناپیوستگی دارند، اولین نقطه ضعف به حساب می‌آیند. مقداری از نیروی واردشده به مواد پلیمری به واسطه دارا بودن خاصیت گرانونکشسانی دچار اتلاف می‌شود. این خود سازوکار اتلاف انرژی است و مقدار دیگری از نیرو باقی می‌ماند. اگر مقدار باقی‌مانده نیرو بیش از انرژی مورد نیاز سطح جدید باشد، این سطح به وجود می‌آید [۸].

سازوکار شکست

پرسش اساسی آن است که چگونه می‌توان پی برد که ترک ایجادشده ترد یا چکش‌خوار است؟ به طور کلی، سه سازوکار برای شکست در نظر گرفته می‌شود:

۱- ترکچه‌زایی به واسطه اعمال نیرو بر جسم پلیمری به وجود می‌آید. ترکچه رشد می‌کند و تبدیل به ترک می‌شود. تا آنجا که ترکچه به ترک تبدیل نشده باشد، می‌توان جلوی رشد آن را گرفت.

با مقایسه با معادله (۷) و با فرض اینکه کار انجام‌شده خارجی در جسم صفر باشد، معادله (۱۱) حاصل می‌شود [۱]:

$$G_c = 2kaU_c \quad (11)$$

که U_c مقدار انرژی کرنشی است که شکست در آن اتفاق می‌افتد. برای حالت خاصی از مواد با قابلیت کشسانی خطی، این با جمله تنش و مدول یانگ مطرح می‌شود [۱]:

$$U_c = \frac{1}{2} \sigma_c \varepsilon_c = \frac{1}{2} \frac{\sigma_c^2}{E} \quad (12)$$

با ادغام دو معادله (۱۱) و (۱۲) [۱]:

$$G_c = k\sigma_c^2 a / E \quad (13)$$

همچنین، در عمل مشاهده شده که k با π متناسب است [۱]:

$$G_c = \pi \sigma_c^2 a / E \quad (14)$$

این حالت دیگری از معادله (۸) است که پارامتر بنیادی G_c را با تنش اعمال‌شده و اندازه ترک بیان می‌کند. این معادله تنها برای تنش صفحه‌ای بیان می‌شود. حال آنکه با افزایش ضخامت (صفحه کرنش)، نسبت پواسون نیز در معادله (۱۴) ظاهر می‌شود. این معادله به صورت زیر نوشته می‌شود [۱]:

$$G_{Ic} = \pi \sigma_c^2 a / E(1 + \nu^2) \quad (15)$$

از آنجا که پارامتر G_{Ic} بیانگر حداقل چقرمگی در مواد است، معمولاً از این جمله برای بیان چقرمگی مواد استفاده می‌شود.

نکته پراهمیت در معادله (۱۵)، وجود زیروند ۱ است که بیشتر در کتاب‌ها و مقاله‌ها با زیروند I مشخص می‌شود. به طور کلی، سه حالت ایده‌آل برای اعمال نیرو بر یک جسم دارای ترک بیان می‌شود. در حالت اول، که با زیروند I مشخص می‌شود، جسم تحت نیروی کشش با شیوه بازشدگی (opening mode) قرار می‌گیرد. در حالت دوم، که با زیروند II نشان داده می‌شود، جسم تحت نیروی برشی درون صفحه‌ای با شیوه سرشی (sliding mode) قرار دارد. این در حالی است که در حالت سوم با زیروند III، این جسم در معرض نیروی برشی خارج از صفحه با شیوه پارگی است. بنابراین، جمله‌های

پلیمری است که درون فاز پلی استیرن آن ذرات لاستیکی پخش شده است. زمانی که ماده مدنظر دوفازی تحت تنش واقع شود، تنش به سرعت وارد محیط پیوسته شده و در نقطه سطح مشترک متمرکز می شود. در این حالت، تنش به سرعت به اولین نقطه ناپیوستگی می رسد. نقطه ناپیوستگی در چنین مواد پلیمری، سطح مشترک ماتریس و فاز پراکنده است. اگر چسبندگی در سطح مشترک خوب باشد، تنش از ماتریس و سطح مشترک عبور می کند و وارد فاز پراکنده می شود. ولی اگر چسبندگی در سطح مشترک مناسب نباشد، در همین ناحیه حفره به وجود می آید که اصطلاحاً به آن جدایش نیز اطلاق می شود. در واقع، درون ذره لاستیکی پراکنده شده درون فاز پیوسته، یک حفره به وجود می آید. این حفره زایی هم اتلاف انرژی بوده و هم نقطه ای است که ترک می تواند از آنجا شروع شود. این حفره با کشش بزرگ تر می شود، به سطح مشترک می رسد و ادامه می یابد تا جسم شکسته شود.

حفره زایی بیشتر در اجسام پلیمری دیده می شود که برای چقرمگی آن ها ذرات لاستیکی را درون فاز ماتریس پراکنده می کنند (پلاستیک های چقرمه شده). در واقع، چسبندگی سطح مشترک اثر بسیار مهم و شگرفی بر فرایند شکست کامپوزیت ها دارد. زمانی که چسبندگی خوبی بین فاز پرکننده و ماتریس پلیمری برقرار باشد، تغییر شکل پلاستیک (شکست هشداردهنده) از راه حفره زایی درون فاز پرکننده در کامپوزیت اتفاق می افتد. اما در مقابل، زمانی که چسبندگی ضعیفی بین فاز پرکننده و ماتریس پلیمری وجود داشته باشد، تغییر شکل عظیمی در کامپوزیت از راه جدایش رخ می دهد و جسم کامپوزیتی دچار شکست می شود. نحوه توزیع و پراکندگی ذرات پرکننده نیز در شکست قطعه کامپوزیتی نقش دارد. داشتن سطح مشترک ضعیف در قطعات کامپوزیتی به سادگی به ایجاد حفره در آن ها منجر می شود. این ایجاد حفره به مراتب ساده تر از ایجاد ترکچه در ماتریس کامپوزیت است. در نهایت سبب می شود، قطعه کامپوزیتی انرژی شکست کمتری داشته باشد و سریع تر دچار شکست شود. در بعضی مواد ممکن است، هر سه سازوکار یادشده با هم اتفاق بیفتند. نکته حائز اهمیت تفاوت در مفاهیم سازوکار وادادگی و شیوه های آن است که باید در مقالات و کتاب های علمی به آن توجه زیادی شود.

اما دو نوع کار ضروری و غیر ضروری برای شکست تعریف می شود. این تقسیم بندی کار با روش مکانیک شکست کشسان خطی بیان می شود. کار ضروری صرف به وجود آمدن سطح جدید شده و کار غیر ضروری صرف ایجاد ترکچه جدید در ماده می شود. در واقع کار غیر ضروری در مناطقی نزدیک به ترکچه اصلی، ترکچه

ولی زمانی که ترک ایجاد شد، دیگر نمی توان برای جسم کاری انجام داد. چنانچه ترکچه ها به هم برسند، قطعاً جسم پلیمری شکسته می شود.

۲- جسم پلیمری دچار تسلیم برشی شود [۹،۱۰].

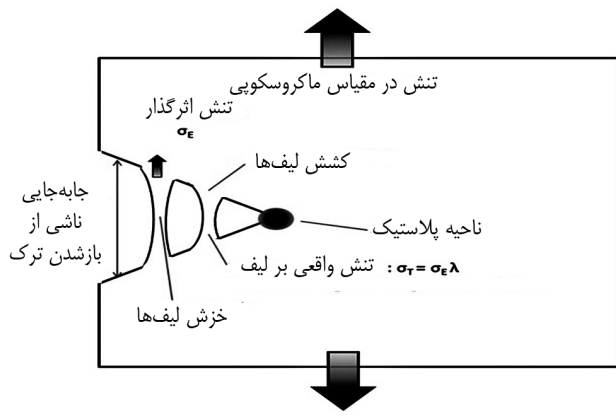
۳- با توجه به بی نظمی ساختاری (structural irregularity) مواد دوفازی (کامپوزیت ها) که به دلیل وجود سطح مشترک بین ماتریس و الیاف است، در توده مواد حفره به وجود آید. این حفره به واسطه فاز پرکننده ایجاد می شود. همچنین، جدایش سطح مشترک (interfacial debonding) رخ می دهد. این جدایش به دلیل گسست چسبندگی میان ماتریس و ذرات پرکننده است [۱۱].

هر یک از این سه سازوکار شکست، سازوکار اتلاف انرژی نیز هستند. وقتی در یک جسم پلیمری ترکچه به وجود می آید، سطح جدیدی ایجاد می شود، بنابراین انرژی در جسم از بین می رود. ایجاد سطح جدید و ترکچه پدیده مخربی به شمار می آید. اما از طرفی، خود یک سازوکار اتلاف انرژی است. نکته با اهمیت این است که ماده باید طوری در نظر گرفته شود که کل آن بتواند در برابر شکست مقاومت کرده و یک پارچگی ماده حفظ شود. در سازوکار تسلیم برشی، حداکثر مقدار تنش برشی در زاویه 45° نسبت به جهت اعمال نیرو ایجاد می شود. مجموعه ای از زنجیرهای پلیمری در این راستا جهت دهی می شوند که به آن تسلیم برشی می گویند. حال با این جهت دهی (45°)، حفره های میکروسکوپی ایجاد می شود که تبدیل به نقطه تمرکز تنش می شوند. ترک می تواند از همین نقطه به وجود آید و رشد کند. در واقع این نوعی تغییر شکل پلاستیک است که جسم پلیمری به طور پیوسته جریان پیدا می کند. از طرفی، این سازوکار شکست که نوعی اتلاف انرژی بوده، نسبت به سازوکار ترکچه زایی، قوی تر است. چون زنجیرهای پلیمری به واسطه حرکت انرژی را تلف می کنند. اتلاف انرژی مقداری روی چقرمگی ماده پلیمری اثر می گذارد. برای اتلاف انرژی در یک جسم پلیمری، دو حالت وجود دارد:

۱- پلیمر باید شکسته شود که نوعی اتلاف انرژی است،

۲- یا زنجیر پلیمری باید جریان پیدا کند.

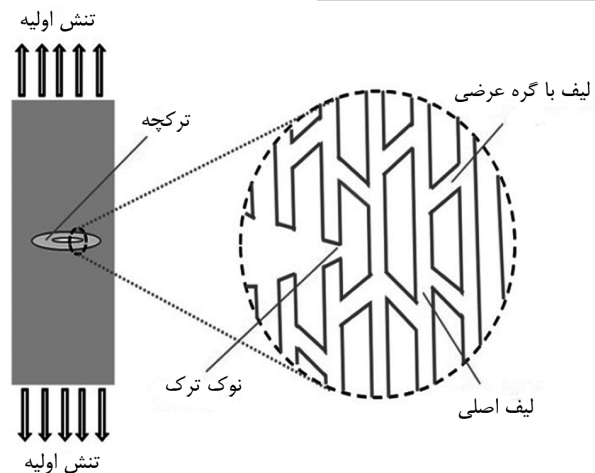
تفاوت دو سازوکار ترکچه زایی و تسلیم برشی در تغییر حجم جسم پلیمری است. در سازوکار برشی حجم تغییر نمی کند. ولی در سازوکار ترکچه زایی سطح جدید به وجود می آید و حجم تغییر می کند. در واقع، در سازوکار برشی زنجیرها جهت گیری پیدا می کنند. حفره زایی سازوکار دیگری از شکست مواد پلیمری است. در کامپوزیت ها معمولاً ماتریس تعیین کننده سازوکار شکست است که غالباً از نحوه رفتار ماتریس تعیین می شود. برای نمونه، HIPS



شکل ۴- ناحیه پلاستیک [۱۰].

شوند و حرکت کنند. بدین منظور یا باید زمان کافی وجود داشته باشد یا دما زیاد باشد. بنابراین گفته می‌شود، زمانی که دما زیاد است، سازوکار تسلیم برشی غالب است. زیرا در دمای کم، به محض وارد شدن ضربه به جسم پلیمری می‌شکند، چون زمان جهت‌دهی کم بوده است. دمای کم مشابه زمان کم است، بنابراین زنجیر پلیمری نمی‌تواند جهت‌گیری کند و سازوکار ترکچه‌زایی غالب است.

در حالت کلی، این که چه سازوکاری غالب است، افزون بر این که به ماهیت پلیمر ربط دارد، به شرایط آزمون هم بستگی دارد. در واقع اگر دما کم باشد، زنجیر پلیمری شکسته می‌شود و سطح جدیدی را به وجود می‌آورد. اما اگر دما زیاد باشد یا سرعت اعمال کرنش کم باشد، آنگاه زنجیرهای پلیمری حرکت می‌کنند و باعث به‌وجود آمدن سطح جدید می‌شوند. زمانی این اتفاق‌ها رخ می‌دهد که به ماده پلیمری زمان کافی داده شود یا از این که از لحاظ دما، انرژی کافی فراهم شود. هنگامی که از ترکچه‌زایی صحبت می‌شود، همان جایی است که شکست ترد اتفاق افتاده است و سطح شکست آینه‌ای تصور می‌شود. زمانی که از شکست چکش‌خوار صحبت می‌شود، بحث تسلیم برشی مطرح است. اما ممکن است که شرایط دما و اعمال به‌گونه‌ای باشد که انتقال از حالت ترد به چکش‌خوار انجام پذیرد. این موضوع نشان می‌دهد، شکست یک ماده پلیمری افزون بر ماهیت، به شرایط محیطی و آزمون هم وابسته است. با این انتقال، سازوکار شکست تغییر می‌کند. انتظار می‌رود، یک ماده چکش‌خوار رفتار کند، اما رفتار شکست آن به ترد تبدیل شده باشد. این یعنی که سازوکار شکست نیز از تسلیم برشی به ترکچه‌زایی تغییر کرده است. ممکن است یا دما بسیار کم باشد یا سرعت اعمال کرنش بسیار زیاد باشد. سرعت اعمال کرنش نشانگر مدت زمان اعمال آن است. به عبارتی، زمان آزمون را با زمان آسایش مقایسه می‌کنند. اگر زمان کافی داده شود،

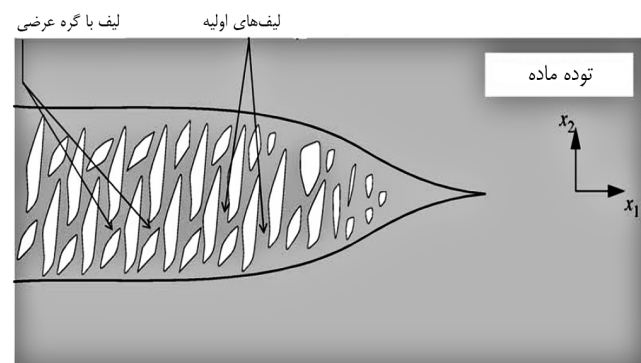


شکل ۲- لیف‌های کوچک اصلی و عرضی نوک ترکچه [۱۰].

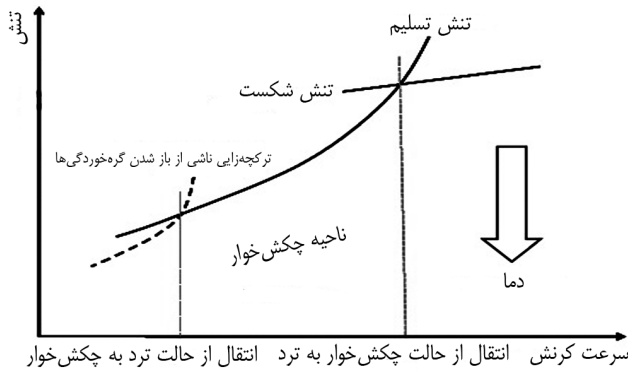
جدید به‌وجود می‌آورد. این ترکچه‌های جدید در مرحله بعد به تقاطعی تبدیل می‌شوند که به هم وصل شده و ترک شروع به رشد می‌کند تا شکست اتفاق افتد. عمده پلیمرهای بی‌شکل، شکست ترد را تجربه می‌کنند. مواد پلیمری نیمه‌بلوری مانند پلی‌اولفین‌ها، تحت تسلیم برشی شکسته می‌شوند. ترک در صفحه‌ای عمود بر راستای محور کشش رشد می‌کند تا ماده پلیمری شکسته شود. در این حالت، ترکچه به ترک تبدیل می‌شود. همان‌گونه که در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است، ترکچه شامل شبکه‌ای از لیفچه‌ها با گره‌های عرضی (cross-tie) است که صفحات ترکچه را قطع می‌کنند. این شبکه با کشیدن ناحیه فعال شده با تنش رشد می‌کند. صفحات ترکچه همواره بر جهت کشش عمود هستند.

حداکثر تنش در نوک ترک متمرکز می‌شود که به آن ناحیه پلاستیک می‌گویند که تغییر شکل آن قابل برگشت نیست. این ناحیه در شکل ۴ نشان داده شده است.

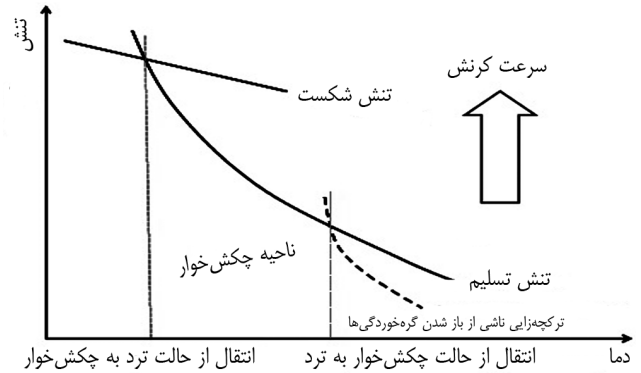
می‌توان تفاوت‌هایی نیز قائل شد که اگر دما کم یا زیاد باشد، کدام سازوکار غالب خواهد بود. اگر سازوکار تسلیم برشی غالب باشد، باید زنجیرهای پلیمری کنار هم و در زاویه 45° جهت‌دهی



شکل ۳- لیف‌های کوچک اولیه (اصلی) و عرضی [۱۲].



شکل ۶- نمودار تنش-سرعت کرنش، انتقال از سازوکار شکست ترد به چکش خوار و برعکس [۱۰].



شکل ۵- نمودار تنش-دما، انتقال از سازوکار شکست ترد به چکش خوار و برعکس [۱۰].

همچنین در همین سال، زینل احمد و همکاران استحکام ضربه‌ای و چقرمگی کامپوزیت‌های دندانی بر پایه پلی‌متیل متاکریلات (PMMA) دارای مقادیر مختلف از لاستیک نیتریل بوتادی‌ان و سرامیک‌های فلزی را بررسی کردند. پلی‌متیل متاکریلات به‌تنهایی مقاومت کمی در برابر سایش، ضربه و تنش نشان می‌دهد. نتایج نشان از بهبود موثر استحکام ضربه‌ای متوسط و افزایش ضریب چقرمگی (K_{IC}) نمونه‌های کامپوزیتی دارد [۱۶].

در سال ۲۰۱۳، رضوی آقچه و همکاران سطح شکست و سازوکارهای تغییر شکل کوپلیمرهای استیرن-آکریلونیتریل (SAN)-پلی‌بوتادی‌ان پیوندخورده به SAN را در ترکیب درصدهای مختلف بررسی کردند. در ترکیب درصدهای ۳۵/۶۵ و ۵۵/۴۵ درجه زیادی از سازوکار شکست حفره‌زایی و نیز ترک‌های چندگانه که به‌وسیله سازوکار شکست تسلیم برشی در ماتریس کامپوزیت ایجاد شده بود، مشاهده شد. در ترکیب درصد ۷۵/۲۵ سازوکار شکست غالب به تسلیم برشی تمایل پیدا کرد و هیچ‌گونه شواهدی مبنی بر سازوکار حفره‌زایی مشاهده نشد و سطح شکست صاف به همراه ترک‌های ریز دیده شد [۱۷].

صالحی وزیری و همکاران در سال ۲۰۱۱، سازوکار شکست و خواص مکانیکی نانوکامپوزیت استیرن-سیلیکا را در مقادیر مختلفی از سیلیکا بررسی کردند. سازوکار حاکم بر شکست پلی‌استیرن در این کامپوزیت از نوع حفره‌زایی است. همچنین، نمونه بهینه در مقدار ۲٪ از افزودنی، به‌دست آمد [۱۸].

نتیجه‌گیری

در بحث مکانیک شکست معیار K_{IC} به‌عنوان معیار اصلی و اساسی

زنجیر پلیمری به آسودگی می‌رسد. در غیر این صورت، آسایش و آسودگی اتفاق نمی‌افتد. بدین دلیل ممکن است با توجه به اینکه دما یا زمان عوض شود، سازوکارهای شکست نیز تغییر کنند. برای مثال، اگر دما خیلی کم باشد و نیرویی به زنجیر پلیمری اعمال شود، این زنجیر نمی‌تواند حرکتی داشته باشد. بنابراین، حتماً به‌صورت سازوکار ترکچه‌زایی می‌شکند (انرژی کافی نیز ندارد).

اگر مقداری دما زیاد شود، همان ماده سازوکار تسلیم برشی را نشان می‌دهد، یعنی نمی‌شکند و در راستای 45° ، زنجیرها جهت‌گیری می‌کنند. اگر دما بسیار زیاد شود، زنجیرهای پلیمری از درون هم بیرون می‌آیند، گره‌خوردگی‌ها باز می‌شوند و از درون آن‌ها بیرون می‌آیند. در شکل‌های ۵ و ۶، نحوه انتقال از سازوکارهای ترد به چکش خوار و برعکس نشان داده شده است [۱۰، ۱۲-۱۴].

در سال ۲۰۱۶، Kostopolous و همکاران حالت‌های اول و دوم (G_{IC} و G_{IIC}) چقرمگی شکست کامپوزیت‌های تقویت‌شده با هیبریدی از نانوصفحه‌های گرافن کم‌لایه (few layered graphene) nano-platelets, GNPs و نانولوله‌های کربنی چنددیواره (MWCNTs) را بررسی کردند. هدف اصلی این کار، افزایش مقدار چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای این کامپوزیت‌ها به‌وسیله اثر هم‌افزایی این دو نوع نانوذرات بود. در ترکیب درصدهای مساوی از این دو نانوذرات، حالت اول چقرمگی شکست ۲۷٪ برای GNPs و ۳۱٪ برای MWCNTs افزایش یافت. این در حالی است که برای هیبریدی از این دو نانوذرات با ترکیب درصد وزنی ۰/۵ و ۱/۰ برای GNPs و MWCNTs، حالت اول چقرمگی شکست تا ۴۵٪ افزایش یافت. همچنین، شواهد حاکی از افزایش ۱۸٪ حالت دوم چقرمگی شکست برای GNPs و ۱۳٪ برای MWCNTs است. در حالت هیبرید این دو نوع از نانوذرات، حالت دوم چقرمگی شکست تا ۲۵٪ افزایش یافت [۱۵].

شکست یک جسم پلیمری در حالت کلی به ترکچه‌زایی، تسلیم برشی و حفره‌زایی تقسیم‌بندی می‌شوند که معمولاً در کامپوزیت‌ها، ماتریس تعیین‌کننده نوع سازوکار شکست جسم خواهد بود.

در بیان مقدار چقرمگی جسم پلیمری مطرح است. چنانچه در محاسبات مکانیک شکست، مقدار محاسبه‌شده برای جسم پلیمری از این معیار بگذرد، آن جسم قطعاً شکسته می‌شود. سازوکارهای

مراجع

1. Crawford R.J., *Plastics Engineering*, Elsevier, Oxford, 119-131, 1998.
2. McCrum N.G., Buckley C.P., and Bucknall C.B., *Principles of Polymer Engineering*, Oxford Science, New York, 167-208, 1997.
3. Dieter G.E. and Bacon D., *Mechanical Metallurgy*, McGraw-Hill, UK, 241-272, 1986.
4. Kinloch A.J. and Young R.J., *Fracture Behaviour of Polymers*, Chapman and Hall, UK, 74-97 and 147-178, 1995.
5. Anderson T.L., *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*, CRC, UK, 25-56, 2005.
6. Sun C.T., *Fracture Mechanics*, Academic, Elsevier, 11-24, 2011.
7. Fischer-Cripps A., *Introduction to Contact Mechanics*, Springer, USA, 32-48, 2007.
8. Callister W., *Fundamentals of Materials Science and Engineering*, John Wiley and Sons, USA, 235-268, 2000.
9. Schreurs P.J.G., *Fracture Mechanics*, Lecture Notes-Course, Eindhoven University of Technology, Department of Mechanical Engineering, Materials Technology, Lecture Notes, Course 4A780, September 2012.
10. Deblieck R., Van Beek D., and Remerie K., Failure Mechanisms in Polyolefines: The Role of Crazing, Shear Yielding and the Entanglement Network, *Polymer*, **52**, 2979-2990, 2011.
11. Awaja F., Zhang S., and Tripathi M., Cracks, Microcracks and Fracture in Polymer Structures: Formation, Detection, Auto-nomic Repair, *Prog. Mater. Sci.*, **83**, 536-573, 2016.
12. Móczó J., *Particulate Filled Polymers, Interaction, Structure and Micromechanical Deformations*, PhD. Thesis, Budapest University of Technology and Economics, Department of Plastics and Rubber Technology, May 2004.
13. Basu S. and Mahajan D., Micromechanics of the Growth of a Craze Fibril in Glassy Polymers, *Polymer*, **46**, 7504-7518, 2005.
14. Jordan J., Jacob K., and Tannenbaum R., Experimental Trends in Polymer Nanocomposites—A Review, *Mater. Sci. Eng. A*, **393**, 1-11, 2005.
15. Kostagiannakopoulou C. and Kostopolous V., Synergy Effect of Carbon Nano-fillers on the Fracture Toughness of Structural Composites, *Composite Part B*, **129**, 18-25, 2017.
16. Alharez A. and Akil H., Impact Strength, Fracture Toughness and Hardness Improvement of PMMA Denture Base Through Addition of Nitrile Rubber/Ceramic Fillers, *Saudi J. Dental Res.*, **8**, 26-34, 2017.
17. Mazidi M. and Abbasi F., Fractographic Analysis of the Crack Resistance of Styrene-Acrylonitrile/Polybutadiene-g-Styrene-Acrylonitrile Blends as Evaluated by the Essential Work of Fracture, *J. Appl. Polym. Sci.*, **131**, 1-10, 2014.
18. Vaziri H., Abadyan M., and Nouri M., Investigation of the Fracture Mechanism and Mechanical Properties of Polystyrene/Silica Nanocomposite in Various Silica Contents, *J. Mater. Sci.*, **46**, 5628-5638, 2011.