مجله مهندسی مکانیک مدرس، شهریور 1394، دوره 15، شماره 6، ص‌ص 1-6

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی رفتار دینامیکی کامپوزیت‌های تک جهته با استفاده از مدل پلاستیسیته تک پارامتری

بهنام داودی[1*]، اشکان محمود اقدمی[2]

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

2- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید، دانشگاه تبریز، تبریز

* تهران، صندوق پستی 163-16765، bdavoodi@mail.iust.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 15 دی 1393

پذیرش: 20 اسفند 1393

ارائه در سایت: 29 فروردین 1394

کلید واژگان:

رفتار دینامیکی

معادلات بنیادی

تست هاپکینسون

ویسکوپلاستیسیته

نرخ کرنش بالا

چکیده

این مقاله به بررسی معادلات بنیادی حاکم بر رفتار دینامیکی کامپوزیت‌های پلیمری خارج از محور در نرخ کرنش‌های مختلف اختصاص دارد. با استفاده از مدل ناهمسانگردی هیل و با در نظر گرفتن فرضیات حاکم بر کامپوزیت‌های لیفی، مدلی برای بیان رفتار دینامیکی کامپوزیت‌های پلیمری تعمیم داده شد. با استفاده از قوانین شارش و تعریف تنش موثر و با در نظر گرفتن فرضیاتی نظیر اینکه کامپوزیت‌ها در راستای الیاف، رفتار پلاستیک از خود نشان نمی‌دهند، ثوابت موجود در رابطه هیل کاهش یافته و به یک ثابت به نام a_{66} تقلیل پیدا کرد که مدل پلاستیسیته تک پارامتری در حالت دو بعدی نامیده شده است. این مدل برای کامپوزیت‌های خارج از محور نیز تعمیم داده شد. برای هر کامپوزیتی با زوایای الیاف مختلف رابطه تنش موثر- کرنش موثر به دست آمد که با انتخاب مناسب ضریب a_{66} که به صورت سعی و خطا به دست می‌آید، می‌توان تمام منحنی‌ها را روی یک منحنی مادر تجمیع کرد. با استفاده از این مدل و داده‌های تجربی محققان مختلف در محدوده تست‌های استاتیکی و شبه استاتیکی (در محدوده نرخ کرنش $0/01s^{-1}$) مدل ویسکوپلاستیسیته‌ای به دست آمده که می‌تواند رفتار کامپوزیت‌های پلیمری را هم در محدوده رفتار استاتیکی و هم در نرخ کرنش‌های بالا (بین $400s^{-1}$ تا $1000s^{-1}$) به خوبی تخمین بزند. ضرایب این مدل در نرخ کرنش‌های بالا به روش برون یابی داده‌های موجود در محدوده تست‌های استاتیکی به دست آمد. درستی این مدل توسط داده‌های تست هاپکینسون مورد بررسی قرار گرفته و صحت آنها به اثبات رسیده است.

Investigation of Dynamic Behavior of Unidirectional Plies Using One Parameter Plastic Model

Behnam Davoodi[1]*, Ashkan Mahmoud Aghdami[2]

1- Faculty of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
2- Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran
* P.O.B. 16765-163 Tehran, Iran, bdavoodi@mail.iust.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 05 January 2015
Accepted 11 March 2015
Available Online 18 April 2015

Keywords:
Dynamic behavior
Constitutive equations
Split Hopkinson Pressure Bar test
Viscoplasticity
High strain rate

ABSTRACT

In this article constitutive equations on dynamic behavior of off-axis polymer matrix composites in different strain rates were investigated. Using the Hill Anisotropy and assumptions governing fiber composites, a model was developed to express the dynamic behavior of polymer matrix composites. Using the flow rules and effective stress and assumptions in fiber composites like non plastic behavior of composites in fiber direction, the Hill parameters were omitted and reduced to one parameter namely, a_{66}. This model was called2D one-Parameter Plastic Model (also it can be developed for 3D composite layers). This model was developed for off axis composites as well. For each composite with different fiber directions, effective stress- effective strain was introduced. By choosing the right value for parameter a_{66} by trial aand error, all the stress-strain curves were collapsed into one single curve. Using this model and the experimental static and quasi- static results gathered from different authors (in range of $0.01s^{-1}$), a viscoplastic model was obtained which can predict the polymer composite response both in static and high strain rate tests (between $400\ s^{-1}$ and $700s^{-1}$). Constant parameters in high strain rates in this model were calculated through extrapolating the data in the static test range. The accuracy of this model was investigated and approved by Split Hopkinson Pressure Bar test. The results showed that the visco plastic model can predict the dynamic response of composite fibers in high strain rates very well.

1- مقدمه

یکی از مواد صنعتی پرکاربرد مواد مرکب یا همان کامپوزیت‌ها می‌باشند. تنوع زیاد این مواد و امکان ساخت مواد مهندسی با خصوصیات مکانیکی متفاوت و همچنین دارا بودن نسبت استحکام به وزن بالا، باعث شده است تا این مواد رفته رفته جای مواد فلزی را در صنایع مختلف بگیرند. کامپوزیت‌ها عموماً در سه نوع پایه پلیمری، پایه فلزی و پایه سرامیکی در صنعت شناخته‌شده هستند. در این بین کامپوزیت‌های پایه پلیمر به سبب راحتی فرایند ساخت و در دسترس بودن، حجم وسیعی از مواد مصرفی در صنعت را به خود اختصاص داده است. کامپوزیت‌های پایه پلیمر بر حسب نوع رزین مصرفی در دو نوع ترموست و ترموپلاست تولید می‌شوند که کامپوزیت‌ها با رزین

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

B. Davoodi, A. Mahmoud Aghdami, Investigation of Dynamic Behavior of Unidirectional Plies Using One Parameter Plastic Model, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 15, No. 6, pp. 1-6, 2015 (In Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.6.40.6]

ترموست برای تکمیل زنجیره مولکولی خود نیازمند پخت در کوره می‌باشند.

کامپوزیت‌ها کاربرد بسیار زیادی در صنایع نظامی، دفاعی و هوایی دارند. بسیاری از این مواد در معرض موج‌های انفجار و یا بارگذاری ضربه‌ای بسیار شدید قرار می‌گیرند بنابراین شناخت رفتار دینامیکی این مواد در نرخ کرنش‌های بالا (در حدود $1000s^{-1}$) برای محققان بسیار مهم به شمار می‌رود و بسیاری از آنهارفتار این مواد را در نرخ کرنش‌های بالا مورد مطالعه قرار داده‌اند. کومار [1] رفتار دینامیکی کامپوزیت‌های شیشه/اپوکسی در نرخ کرنش متوسط را مورد مطالعه قرار داده است. وی نشان داد که کامپوزیت‌های شیشه/اپوکسی با موقعیت‌های مختلف الیاف، نسبت به نرخ کرنش حساس هستند. ال-هاباک [۲،3] رفتار کامپوزیت شیشه/ اپوکسی را تحت نرخ کرنش فشاری بالا مورد مطالعه قرار داده و نشان داده‌اند که این کامپوزیت‌ها حساسیت کمی نسبت به نرخ کرنش‌های بالا از خود نشان می‌دهند. وینسون و همکارانش [5،4] رفتار تعداد زیادی از کامپوزیت‌ها را در نرخ کرنش‌های فشاری بالا مورد مطالعه قرار دادند و داده‌های تجربی زیادی را با توجه به مدول و استحکام کامپوزیت‌ها به دست آورده‌اند. با این حال تمام این کارها باهدف بررسی اثر نرخ کرنش بر استحکام فشاری و رفتار تنش- کرنش انجام شده است و مطالعه‌ای برای ارائه رابطه تنش- کرنش وابسته به نرخ کرنش انجام نشده است. هاردینگ و همکارانش [6] و ستبو گیلات [7] خصوصیات کامپوزیت‌های تک جهته را در شرایط ضربه کششی مورد مطالعه قرار دادند و خواص مکانیکی کامپوزیت در حالت بارگذاری ضربه کششی را استخراج کردند. رفتار کامپوزیت‌ها تحت نرخ کرنش پایین توسط گیت و سان [8] و یوون و سان [9] با استفاده از تابع پتانسیل تک پارامتری مورد مطالعه قرار گرفت و خواص الاستیک- ویسکوپلاستیک کامپوزیت‌های AS4/PEEK مشخص شد و مشاهده کردند که خواص ویسکوپلاستیک را می‌توان به خوبی با استفاده از مدل پلاستیسیته تک پارامتری مشخص کرد. شکریه و مسلمانی [10] رفتار دینامیکی کامپوزیت‌های پایه پلیمری را با استفاده از رابطه جانسون کوک توسعه داده و مدل جدیدی را معرفی کرده‌اند.

در این مقاله با در نظر گرفتن نظریه ناهمسانگردی هیل و تعمیم آن برای مواد کامپوزیت، مدل پلاستیسیته تک پارامتری برای کامپوزیت‌های تک جهته ارائه شده است. به عبارت دیگر با استفاده از قوانین موجود در پلاستیسیته برای مواد ناهمسانگرد و با در نظر گرفتن برخی از فرضیات موجود در مکانیک مواد مرکب، سعی شده است مدلی برای رفتار کامپوزیت‌های تک جهته در نرخ کرنش‌های بالا ارائه شود. درستی این مدل با داده‌های تجربی موجود حاصل از آزمایش هاپکینسون[1] کامپوزیت‌های شیشه/ اپوکسی مقایسه و تطابق خوبی بین نتایج پیش‌بینی‌شده و نتایج تجربی مشاهده شد.

2- نظریه مومسانی نا همسانگردی هیل

هیل ناهمسانگردی مومسان را بدون توجه به منشأ بلور شناختی آن به طور کمی فرمول‌بندی کرده است. فرضیات او بر این امر بنا شده که هر ماده همگن با سه محور متعامد ناهمسانگردی x، y، z مشخص می‌شود و خواص ماده حول آنها تقارن درجه 2 دارند. در ورق نورد شده x، y، z را به ترتیب در امتداد نورد کاری ، عرض ورق و ضخامت آن در نظر می‌گیرند. در این نظریه فرض می‌شود که استحکام‌های کششی و فشاری در هر امتداد مفروض برابرند. معیار تسلیم همسانگردی به صورت رابطه (1) است:

$$2f(\sigma_{ij}) = F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 \qquad (1)$$

1- Split Hopkinson Pressure Bar

$$+2L\tau_{yz}^2 + 2M\tau_{zx}^2 + 2N\tau_{xy}^2 = 1$$

که F،G، H، L، M و N ثابت‌هایی هستند که ناهمسانگردی را مشخص می‌کنند [11].

3- مدل پلاستیسیته تک پارامتری

مشابه مدل هیل را می‌توان برای کامپوزیت‌ها که یک ماده ناهمسانگرد می‌باشند بکار گرفت. می‌توان تابع تسلیم که تابعی از مربعات تنش‌ها است را در حالت سه بعدی برای کامپوزیت‌ها مطابق رابطه (2) در نظر گرفت:

$$\begin{aligned}2f(\sigma_{ij}) &= a_{11}\sigma_{11}^2 + a_{22}\sigma_{22}^2 + a_{33}\sigma_{33}^2 + 2a_{12}\sigma_{11}\sigma_{22}\\ &+2a_{13}\sigma_{11}\sigma_{33} + 2a_{23}\sigma_{22}\sigma_{33} + 2a_{44}\sigma_{23}^2 + 2a_{55}\sigma_{13}^2\\ &+2a_{66}\sigma_{12}^2 = k\end{aligned} \qquad (2)$$

تنش‌های σ_{ij} نشانگر جهت‌های اصلی مواد هستند. ضرایب a_{ij} نشان‌دهنده میزان ناهمسانگردی در پلاستیسیته هستند. مقادیر a_{ij} را می‌توان با آزمایش‌های تجربی به دست آورد.

مطابق رابطه (3) می‌توان با استفاده از قانون شارش، کرنش پلاستیک جزئی را به عنوان تابعی از تابع پتانسیل مومسان نوشت [12]:

$$d\varepsilon_{ij}^p = \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \qquad (3)$$

که در آن بالانویس p نشان‌دهنده محدوده پلاستیک است. کار پلاستیک در واحد حجم توسط رابطه (4) بیان می‌شود.

$$dW^p = \sigma_{ij}d\varepsilon_{ij}^p = 2fd\lambda \qquad (4)$$

تنش موثر در رابطه (5) نشان داده شده است [13]:

$$\bar{\sigma} = \sqrt{3f} \qquad (5)$$

کرنش موثر پلاستیک و کار پلاستیک را می‌توان طبق رابطه (6) تعریف کرد:

$$dW^p = \bar{\sigma}d\bar{\varepsilon}^p \qquad (6)$$

با جایگذاری روابط (4) و (5) در (6)، روابط (7) و (8) به صورت زیر خواهند بود:

$$d\bar{\varepsilon}^p = 2/3\bar{\sigma}d\lambda \qquad (7)$$

$$d\lambda = 3/2\left(\frac{d\bar{\varepsilon}^p}{d\bar{\sigma}}\right)\left(\frac{d\bar{\sigma}}{\bar{\sigma}}\right) \qquad (8)$$

با مقایسه روابط (2) و (5) می‌توان به رابطه (9) رسید:

$$k = 2/3\bar{\sigma}^2 \qquad (9)$$

کرنش کل $d\epsilon_{ij}$ را می‌توان به دو قسمت کرنش الاستیک $d\varepsilon_{ij}^e$ و کرنش پلاستیک $d\varepsilon_{ij}^p$ طبق رابطه (10) تقسیم کرد.

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p \qquad (10)$$

الیاف رفتار پلاستیک از خود نشان نمی‌دهند بنابراین می‌توان فرض کرد که کامپوزیت‌ها در راستای الیاف تا شکست نهایی رفتار خطی الاستیک از خود نشان می‌دهند. بنابراین منطقی است که فرض شود:

$$d\varepsilon_{11}^p = 0 \qquad (11)$$

این فرض باعث ایجاد شرایط زیر می‌شود که در رابطه (12) نشان داده شده است:

$$a_{11} = a_{12} = a_{13} = 0 \qquad (12)$$

فرض بر این است که در تابع تسلیم هیل هیچ انبساط پلاستیکی رخ نمی‌دهد. بنابراین با در نظر گرفتن رابطه (12) شرایط زیر طبق رابطه (13) رخ خواهد داد:

$$a_{22} = a_{33}, a_{23} = -a_{22} \qquad (13)$$

در حالت تنش صفحه‌ای[2] و در نظر گرفتن شرایط رابطه (13)، تابع مومسان (2) به رابطه (14) تقلیل پیدا می‌کند:

$$2f = \sigma_{22}^2 + 2a_{66}\sigma_{12}^2 \qquad (14)$$

2- Plain Stress

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.6.40.6]

که در آن $a_{22} = 1$ است. کرنش پلاستیک برون صفحه‌ای به صورت رابطه (15) محاسبه می‌شود:

$$d\varepsilon_{33}^{p} = a_{23}\sigma_{22}d\lambda \tag{15}$$

از تابع پتانسیل مومسان، کرنش پلاستیک جزئی به شکل رابطه (16) استخراج می‌گردد:

$$\begin{Bmatrix} d\varepsilon_{11}^{p} \\ d\varepsilon_{22}^{p} \\ d\gamma_{12}^{p} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ \sigma_{22} \\ 2a_{66}\sigma_{12} \end{Bmatrix} d\lambda \tag{16}$$

که در آن $\gamma_{12} = 2\varepsilon_{12}$ کرنش برشی مهندسی است. تنش موثر مربوطه توسط رابطه (17) بیان می‌شود:

$$\bar{\sigma} = \left[\frac{3}{2}(\sigma_{22}^{2} + 2a_{66}\sigma_{12}^{2})\right]^{1/2} \tag{17}$$

و کرنش موثر جزئی از روابط (7) و (17) به شکل رابطه (18) به دست می‌آید:

$$d\bar{\varepsilon}^{p} = \left[\frac{2}{3}(\sigma_{22}^{2} + 2a_{66}\sigma_{12}^{2})\right]^{1/2} d\lambda \tag{18}$$

تعریف رابطه جزئی پلاستیک تنش- کرنش به مقادیر a_{66} و $d\lambda$ بستگی دارد.

4- مدل دو بعدی ویسکوپلاستیسیته

ثابت a_{66} و رابطه بین $d\bar{\sigma}$ و $d\bar{\varepsilon}^{p}$ را می‌توان از طریق تست کشش شبه استاتیکی خارج از محور به دست آورد. محور x در امتداد نیروی کشش است که با امتداد الیاف (محور x_1) زاویه θ می‌سازد. تنش‌ها در راستای محورهای اصلی ماده در شکل 1 نشان داده شده است. تنش‌های خارج از محور با رابطه (19) نشان داده شده است.

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= \cos^2\theta\,\sigma_x \\ \sigma_{22} &= \sin^2\theta\,\sigma_x \\ \sigma_{12} &= -\sin\theta\,\cos\theta\,\sigma_x \end{aligned} \tag{19}$$

که در آن σ_x تنش اعمالی است.

با جایگذاری رابطه (19) در روابط (16) و (17) می‌توان روابط (20- 22) را نتیجه گرفت که [13]:

$$\bar{\sigma} = h(\theta)\sigma_x \tag{20}$$

$$d\bar{\varepsilon}^{p} = \frac{2}{3}h(\theta)\sigma_x\, d\lambda \tag{21}$$

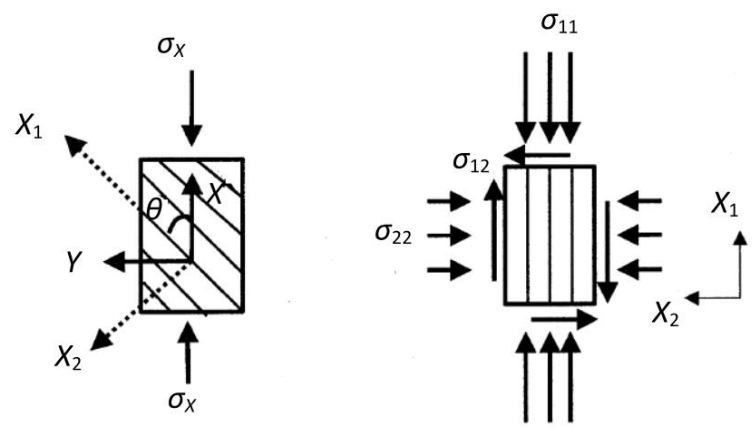
$$h(\theta) = \left[\frac{3}{2}(\sin^4\theta + 2a_{66}\sin^2\theta\cos^2\theta)\right]^{1/2} \tag{22}$$

با تغییر مختصات رابطه (23) به صورت زیر خواهد بود [13]:

$$d\varepsilon_{x}^{p} = \cos^2\theta d\varepsilon_{11}^{p} + \sin^2\theta d\varepsilon_{22}^{p} - \frac{1}{2}\sin 2\theta d\gamma_{12}^{p} \tag{23}$$

که در آن $d\varepsilon_{x}^{p}$ کرنش پلاستیک جزئی اندازه‌گیری شده در راستای x است. با استفاده از روابط (16)، (19) و (23) می‌توان به رابطه (24) رسید:

$$d\varepsilon_{x}^{p} = [\sin^4\theta + 2a_{66}\sin^2\theta\cos^2\theta]\sigma_x d\lambda = \frac{2}{3}h^2(\theta)\sigma_x d\lambda \tag{24}$$



شکل 1 اجزای تنش در مختصات خارج از محور و روی محور[1]

با مقایسه روابط (21) و (24) می‌توان رابطه (25) را نتیجه گرفت [13]:

$$d\bar{\varepsilon}^{p} = d\varepsilon_{x}^{p}/h(\theta) \tag{25}$$

بنابراین برای بارگذاری ساده، $d\bar{\varepsilon}^{p}$ قابل انتگرال‌گیری بوده و $\bar{\varepsilon}^{p}$ قابل تعریف است. با انتگرال‌گیری از رابطه (25) رابطه (26) به شکل زیر خواهد بود [13]:

$$\bar{\varepsilon}^{p} = \varepsilon_{x}^{p}/h(\theta) \tag{26}$$

و با استفاده از روابط (19) و (26) رابطه بین $\bar{\varepsilon}^{p}$ و $\bar{\sigma}$ را می‌توان از رابطه $\sigma_x - \varepsilon_x^p$ که از طریق آزمایش کشش خارج از محور به دست می‌آید، محاسبه کرد. در واقع روابط (27) و (28) به شکل زیر خواهند بود [13]:

$$\frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\varepsilon}^{p}} = h^2(\theta)\frac{d\sigma_x}{d\epsilon_x^p}\sigma_{22} = \sin^2\theta\,\sigma_x \tag{27}$$

$$d\lambda = \frac{3}{2}\frac{1}{h^2(\theta)}\frac{d\epsilon_x^p}{d\sigma_x}\frac{d\sigma_x}{\sigma_x} \tag{28}$$

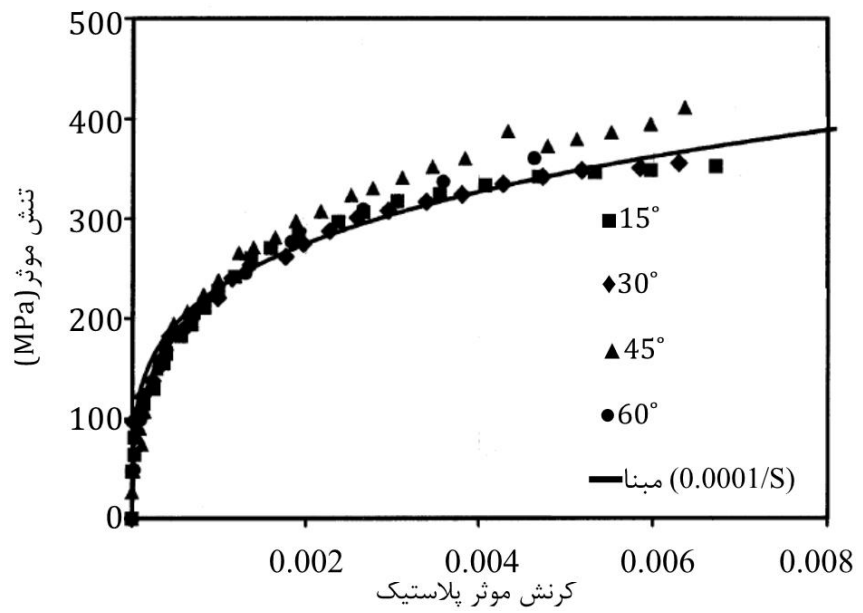
با استفاده از روابط (20) و (26) می‌توان σ_x و ε_x^p اندازه‌گیری شده را به عنوان توابعی از $\bar{\sigma}$ و $\bar{\varepsilon}^{p}$ رسم کرد. به ازای مقادیر مختلف θ منحنی $\bar{\varepsilon}^{p} - \bar{\sigma}$ بایستی یکسان باشد. این امر با انتخاب صحیح پارامتر a_{66} امکان‌پذیر است. مقدار a_{66} را می‌توان با سعی و خطا پیدا کرد تا جایی که کلیه منحنی‌های تنش- کرنش پلاستیک روی یک منحنی مادر $\bar{\varepsilon}^{p} - \bar{\sigma}$ قرار بگیرند. در عمل دیده‌شده که منحنی تنش- کرنش نمونه‌های °90 مستقل از مقدار a_{66} می‌باشند [13]. بنابراین منحنی تنش موثر- کرنش پلاستیک که از نمونه‌های °90 به دست آمده به عنوان منحنی مادر در نظر گرفته می‌شود. مقدار a_{66} طوری انتخاب می‌شود که کلیه منحنی‌های تست کشش خارج از محور نمونه‌ها روی این منحنی مادر قرار بگیرند. اگر بتوان برای a_{66} مقدار ثابتی پیدا کرد، در آن صورت مدل پلاستیسیته تک پارامتری معتبر است.

در عمل دیده شده است که برای کامپوزیت‌های لیفی نقطه تسلیم مشخصی وجود ندارد و غیرخطی بودن به صورت تدریجی به وجود می‌آید. به این دلیل از توابع نمایی مانند رابطه (29) برای تعریف منحنی تنش موثر- کرنش پلاستیک موثر استفاده می‌شود [14]:

$$\bar{\varepsilon}^{p} = A\bar{\sigma}^{n} \tag{29}$$

A ضریبی است که وابسته به نرخ کرنش است ولی طبق داده‌های تجربی به دست آمده [13] مقدار n و a_{66} برای کل محدوده نرخ کرنش ثابت است. در شکل‌های 2، 3 و 4 منحنی تجمیع شده تنش موثر- کرنش موثر برای نرخ کرنش‌های $0/0001s^{-1}$، $0/01s^{-1}$ و $1s^{-1}$ برای کامپوزیت شیشه/اپوکسی نشان داده شده است.

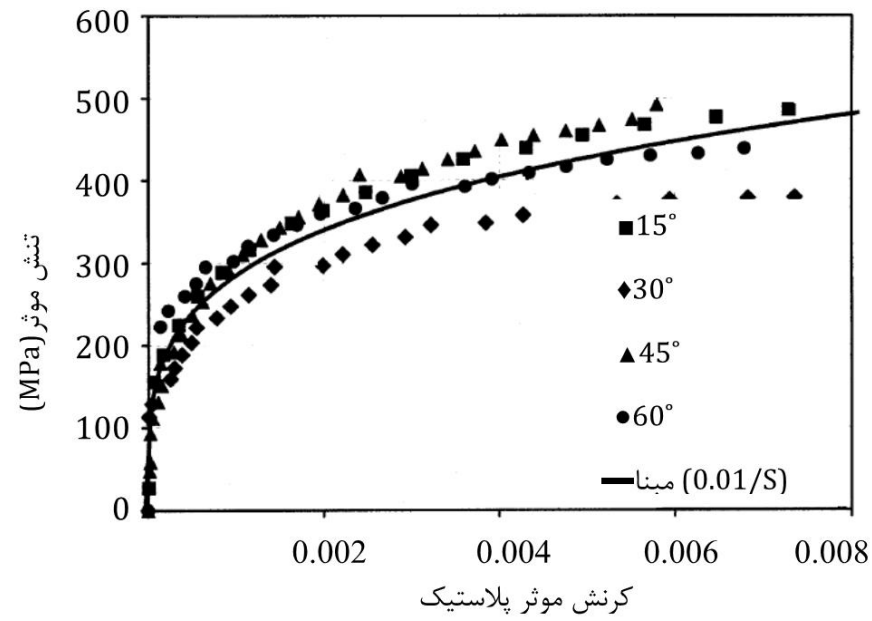
در شکل 5 نمودار کرنش موثر با زمان در نرخ کرنش $0/0001s^{-1}$ برای نمونه‌های 30 و 45 درجه نشان داده شده است.



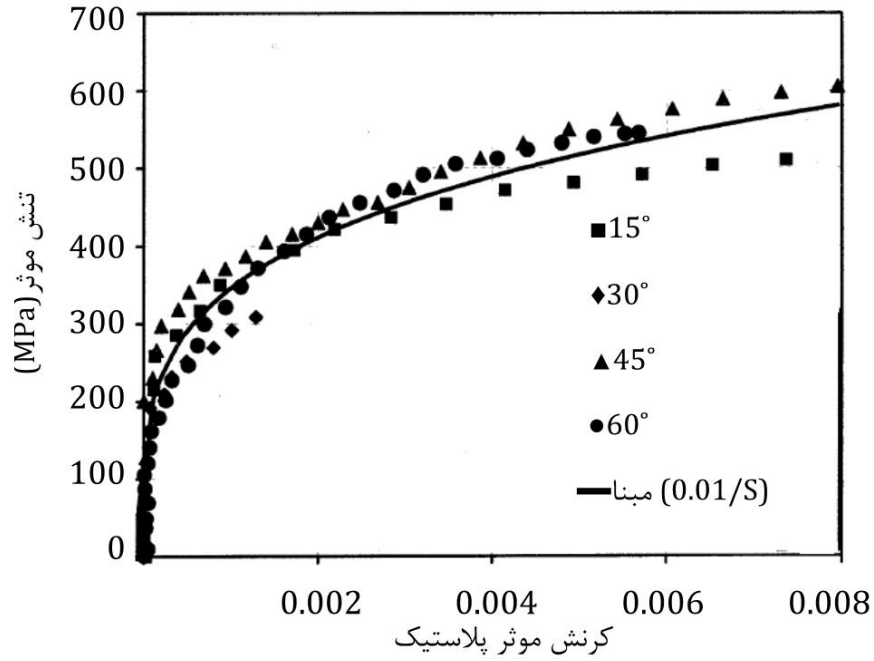
شکل 2 منحنی تجمیع شده تنش موثر- کرنش موثر برای کامپوزیت شیشه/اپوکسی 8552 در نرخ کرنش $0/0001s^{-1}$ با $a_{66} = 6.0$ [14]

1- On axis

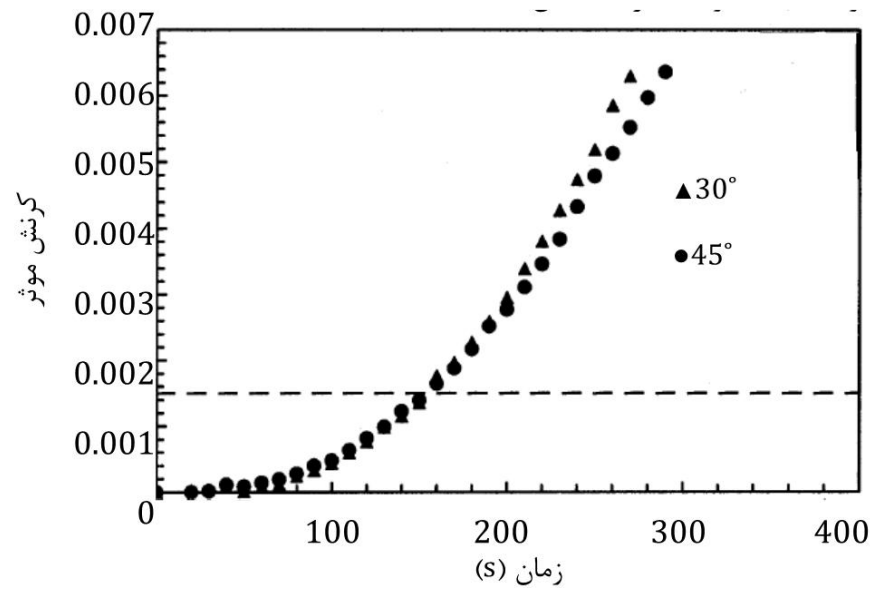
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.6.40.6]



شکل 3 منحنی تجمیع شده تنش موثر- کرنش موثر برای کامپوزیت شیشه/اپوکسی 8552 در نرخ کرنش $0/01s^{-1}$ با a_{66} = 6.0 [14]

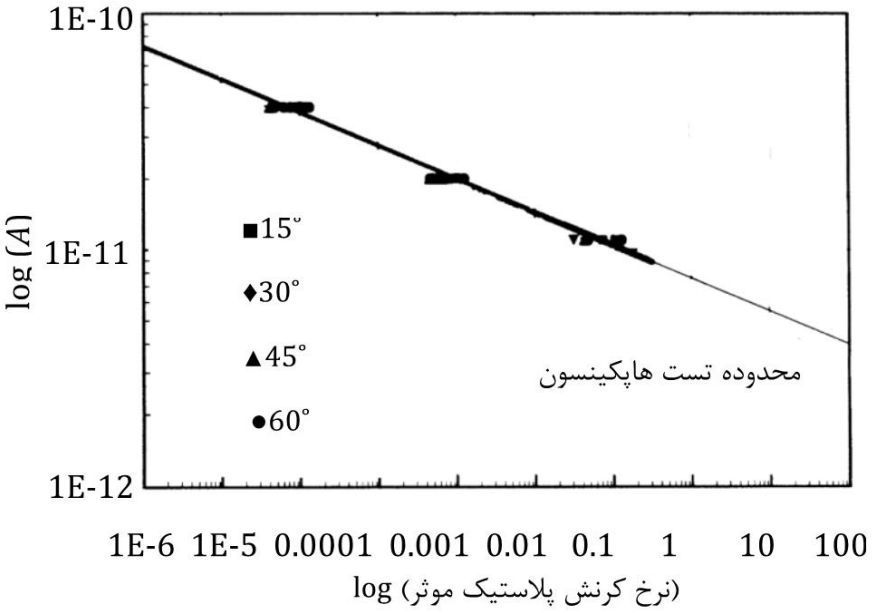


شکل 4 منحنی تجمیع شده تنش موثر- کرنش موثر برای کامپوزیت شیشه/اپوکسی 8552 در نرخ کرنش $1s^{-1}$ با a_{66} = 6.0 [14]



شکل 5 منحنی کرنش پلاستیک با زمان برای نمونه‌های 30 و 45 درجه در نرخ کرنش $0/0001s^{-1}$ [14]

با توجه به شکل 5 دیده می‌شود حتی در نرخ کرنش‌های پایین، مقدار نرخ کرنش به ازای کرنش‌های زیر 1/5% ثابت باقی نمی‌ماند و عملاً نرخ کرنش در کرنش‌های بالاتر از 1/5% به مقدار ثابتی می‌رسد. این عدم ثبات، در نرخ کرنش‌های بالا بیشتر مشهود است. بنابراین می‌توان انتظار داشت مدل به دست آمده و ضرایب حاصل در کرنش‌های زیر 1/5% تطابق خوبی با نتایج تجربی از خود نشان ندهند. این پدیده به صورت ملموسی در شکل 10 دیده شده است.



شکل 6 برون‌یابی مدل ویسکوپلاستیسیته تا محدوده نرخ کرنش دستگاه هاپکینسون برای کامپوزیت شیشه/اپوکسی 8553 [16]

جدول 1 خواص مواد برای کامپوزیت شیشه/ 8553 [16]

E_1 (GPa)	43/34
E_2 (GPa)	12/73
G_{12} (GPa)	4/46
υ_{12}	0/29
a_{66}	1/40
x (MPa)$^{-n}$	$1/045 \times 10^{-11}$
m	0/14
n	4/0

اگر A تابع نمایی از نرخ کرنش موثر پلاستیک در نظر گرفته شود می‌توان رابطه (30) را به شکل زیر نوشت:

$$A = x(\bar{\varepsilon}^P)^m \tag{30}$$

و مدل ویسکوپلاستیسیته برابر خواهد بود با رابطه (31):

$$\bar{\varepsilon}^P = x(\bar{\varepsilon}^P)^m(\bar{\sigma})^n \tag{31}$$

اگر معادله بنیادی 31 در تمام محدوده نرخ کرنش صدق کند، در آن حالت می‌توان ضرایب x، m و n را در نرخ کرنش‌های پایین به دست آورد. تست نمونه‌ها بایستی در حالت تنش صفحه‌ای انجام گیرد. سان و تیروپوکوژی [15] این پارامترها را برای کامپوزیت تک جهته شیشه/ 8553 با تست نمونه‌های خارج از محور روی دستگاه تست کشش تا نرخ کرنش $1s^{-1}$ محاسبه کردند. مدول الاستیسیته و مقادیر این ضرایب در جدول 1 نشان داده شده است.

شکل 6 نشان‌دهنده نمودار لگاریتمی معادله 31 است که در تست نرخ کرنش پایین با دستگاه تست کشش به دست آمده است.

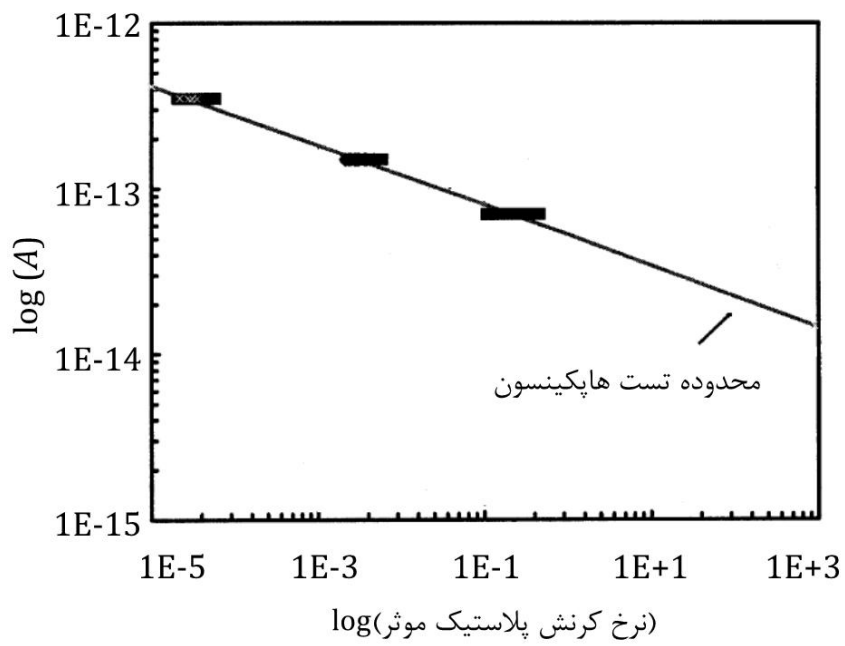
با توجه به شکل 6 دیده می‌شود که تابع نمایی تطابق خوبی با داده‌های تجربی دارد. برای نرخ کرنش‌های بالاتر از $1s^{-1}$، A را می‌توان با برون‌یابی بر اساس مدل نمایی پیدا کرد. نمودار مشابهی را تسای و سان [14] برای کامپوزیت شیشه/ اپوکسی 8552 به دست آوردند که در شکل 7 نشان داده شده است.

بنابراین می‌توان گفت با محاسبه معادله 31 و به دست آوردن منحنی تنش موثر- کرنش موثر در نرخ کرنش‌های بالاتر می‌توان رفتار کامپوزیت و منحنی تنش- کرنش آنرا در نرخ کرنش‌های بالا پیش‌بینی کرد.

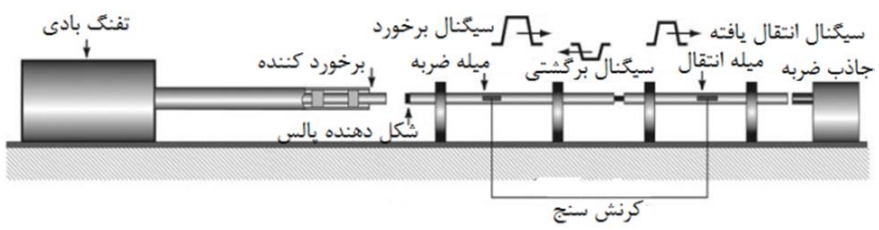
5- تست هاپکینسون

یکی از پرکاربردترین روش‌های انجام تست‌های نرخ کرنش بالا، استفاده از دستگاه فشاری هاپکینسون است.

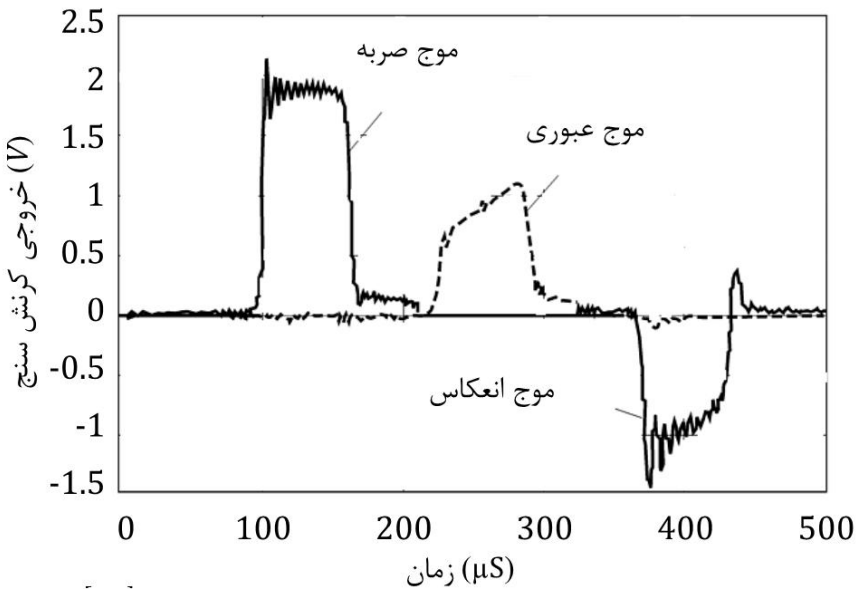
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.6.40.6]



شکل 7 مدل ویسکوپلاستیسیته تا محدوده نرخ کرنش دستگاه هاپکینسون برای کامپوزیت شیشه/اپوکسی 8552 [14]



شکل 8 شماتیک اجزای تشکیل‌دهنده دستگاه میله فشاری هاپکینسون [17]

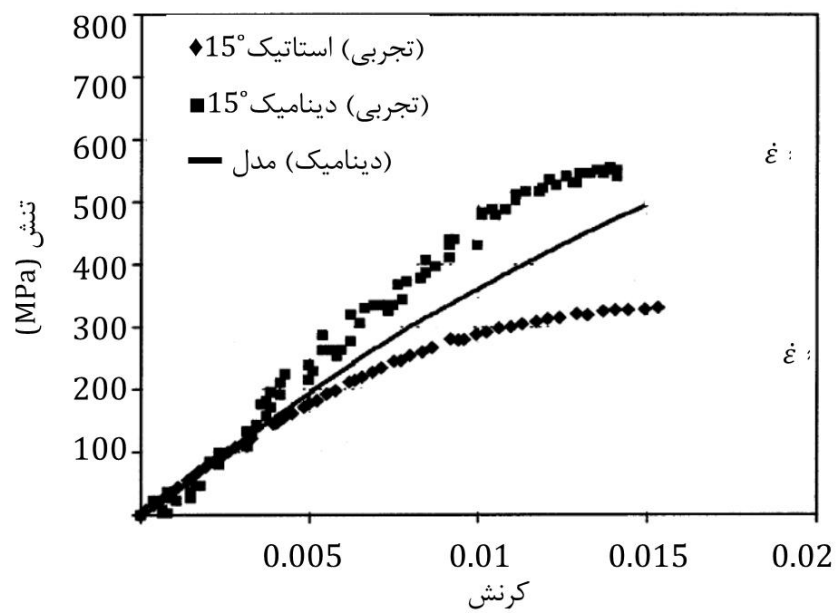


شکل 9 نمونه‌ای از سیگنال‌های برخورد، انتقال و انعکاس [18]

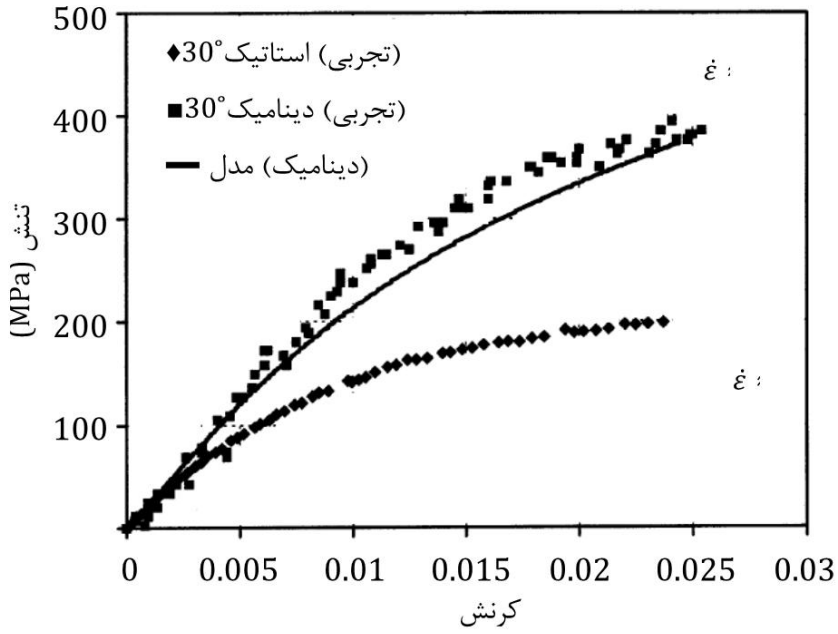
این دستگاه شامل میله ضربه، میله برخورد و میله انتقال است. نمونه بین میله‌های برخورد و انتقال قرار داده می‌شود. نمونه‌ای از این دستگاه در شکل 8 نشان داده شده است.

در این تست کل روند تنش/ تغییر شکل نمونه را می‌توان با انجام اندازه‌گیری کرنش الاستیک در طول میله‌ها به دست آورد. با اندازه‌گیری کرنش الاستیک میله‌ها، کرنش در دو انتهای نمونه بدست خواهد آمد. دو عدد کرنش سنج یکی روی میله برخورد و دیگری روی میله انتقال نصب می‌شود که کرنش سنج نصب‌شده روی میله برخورد پالس ضربه و پالس انعکاس را ثبت کرده و کرنش سنج قرار داده‌شده روی میله انتقال، پالس منتقل‌شده را ثبت می‌کند. نمونه‌ای از سیگنال‌های دریافتی در شکل 9 نشان داده شده است.

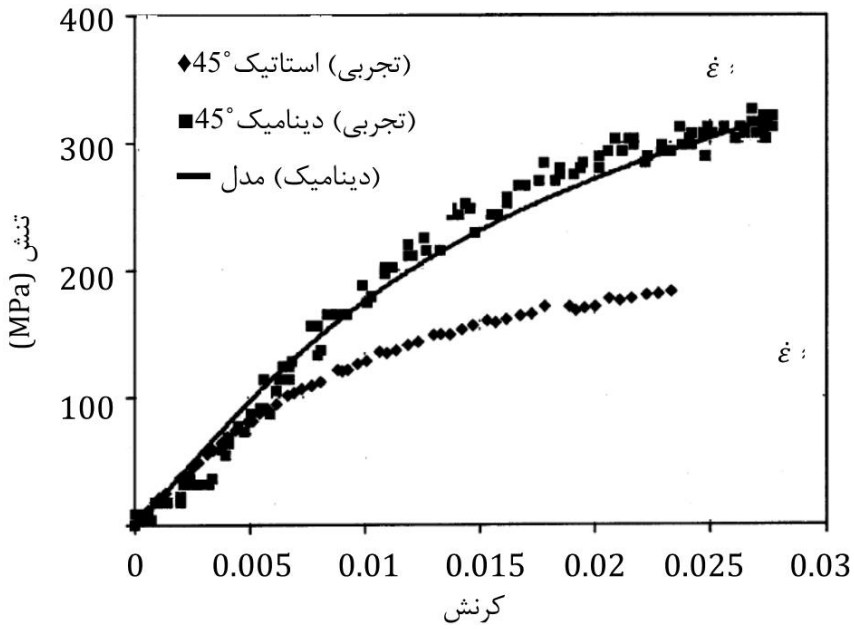
مدل ویسکوپلاستیسیته بر اساس نرخ کرنش‌های پایین می‌تواند در نرخ کرنش‌های بالا نیز صادق و قابل استفاده باشد. برای بررسی درستی این مدل در نرخ کرنش‌های بالا، از دستگاه تست هاپکینسون استفاده شده است. منحنی‌های تنش- کرنش حاصل از تست هاپکینسون برای نمونه‌های 15، 30، 45 و 60 درجه در شکل‌های 10 تا 13 نشان داده شده است. نمودار تنش در حالت تست شبه استاتیک نیز به منظور مقایسه به منحنی‌ها اضافه شده است.



شکل 10 مقایسه منحنی‌های تنش- کرنش در نرخ کرنش‌های بالا و پایین برای نمونه 15 درجه [14]



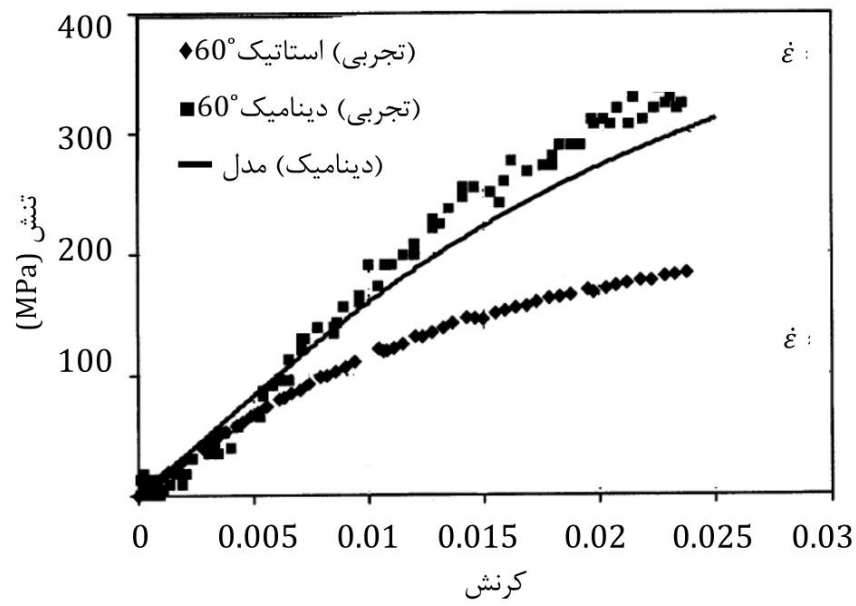
شکل 11 مقایسه منحنی‌های تنش- کرنش در نرخ کرنش‌های بالا و پایین برای نمونه 30 درجه [14]



شکل 12 مقایسه منحنی‌های تنش- کرنش در نرخ کرنش‌های بالا و پایین برای نمونه 45 درجه [14]

با توجه به شکل 10، همانطور که انتظار می‌رفت در کرنش‌های زیر 1/5% به سبب ثابت نبودن نرخ کرنش، اختلافی در مدل تئوری با نتایج تجربی دیده می‌شود که بیشترین مقدار این اختلاف به میزان20% و در کرنش 1% است. در بقیه موارد بیشترین درصد خطای مدل تئوری با نتایج تجربی حدود 14% است و در اغلب نقاط نتایج تئوری و عملی برهم منطبق هستند. با توجه به نتایج ارائه‌شده مدل ویسکوپلاستیسیسته تک پارامتری تطابق نسبتاً خوبی با نتایج تجربی به خصوص در نرخ کرنش‌های بالا دارد.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.6.40.6]



شکل 13 مقایسه منحنی‌های تنش- کرنش در نرخ کرنش‌های بالا و پایین برای نمونه 60 درجه [14]

6- نتیجه‌گیری

در این مقاله یکی از مدل‌های موجود در بیان رفتار دینامیکی مواد کامپوزیتی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. با استفاده از مدل ناهمسانگردی هیل، مدل پلاستیسیته تک پارامتری در حالت تنش صفحه‌ای برای کامپوزیت‌های تک جهته ارائه شد. با تعریف تنش موثر و کرنش موثر، نمودارهای تنش و کرنش در زوایای مختلف الیاف در نمودار واحدی به نام تنش موثر و کرنش موثر تجمیع شدند. برای درستی مدل پیشنهادشده، پاسخ این مدل در نرخ کرنش‌های بالا با نتایج حاصله از آزمایش‌های محققان که با استفاده از دستگاه هاپکینسون انجام شده بود مقایسه گردید و تطابق خوبی بین نتایج تجربی و مدل موجود مشاهده شد.

7- مراجع

[1] P. Kumar, And B.D. Agarwal, Dynamic compressive behavior of unidirectional GFRP for various fiber orientations, *Material Letters,* 4(2), 111, 1986.

[2] A.M.A. El-Habak., Mechanical behavior of woven glass fiber reinforced composites under impact compression load. *Composites,* 22(2), 129, 1991.

[3] A.M.A. El-Habak, Compressive resistance of unidirectional GFRP under high rate of loading. *J. Compos. Tech. and Research,* 15(4), 311, 1993.

[4] T.J. Frey, J.R. Vinson and I.W. Hall, High strain rate effects on mechanical properties of glass/polyester and carbon/aluminum composite materials, *AIAA-91-0930-CP,* 19, 1991.

[5] J.F. Newill and J.R. Vinson, Some high strain rate effects of composite material, *Proceedings of Ninth International Conference on Composite Materials,* 5, 269, 1993.

[6] J. Harding and L.M. Welsh, A tensile testing technique for fiber reinforced composites at impact rates of strain, *J. Mater. Science,* 18, 1810, 1993.

[7] G.H. Staab and A. Gilat, Behavior of angle-ply glass/epoxy laminates under tensile loading at quasi-static and high rates, *Proceedings of the American Society for Composites Seventh Technical Conference,* 1041, 1992.

[8] T.S. Gates and C.T. Sun, Elastic/viscoplastic constitutive model for fiber reinforced thermoplastic composites, *AIAA Journal;* 29:457–63, 1991.

[9] K.J. Yoon and C.T. Sun, Characterization of elastic-viscoplastic properties of an AS4/PEEK thermoplastic composite, *Journal of Composite Materials,* 25:1277–98, 1991.

[10] M.M. Shokrieh, A.M. Kashani and R. Mosalmani, Introducing a new model to predict the mechanical behavior of polymers, *22nd annual conference on mechanical engineering, Shahid chamran University, Ahvvaz, Iran,* 2014.

[11] R. Hill, P. Roy, Mathematical Theory of Plasticity, *Sco. London,* 193A p.21, 1948.

[12] W.F. Hosford and R.M. Caddel, Metal Forming Third Edition, *Cambridge University Press.*

[13] C.T. Sun and J.L. Chen, A Simple Flow Rule for Characterizing Nonlinear Behavior of Fiber Composites, *Journal of Composite Materials* 23: 1009, 1989.

[14] J. Tsai and C.T. Sun, Constitutive model for high strain rate response of polymeric composites, *Composites Science and Technology* 62, 1289–1297, 2002.

[15] S.V. Thiruppukuzhi and C.T. Sun, Testing and modeling high strain rate behavior of polymeric composites, *Composites Part B 29B,* 535–546, 1998.

[16] S.V. Thiruppukuzhi and C.T. Sun, Testing and modeling high strain rate behavior of polymeric composites, *J. Compos. Mater.*

[17] *Society of Plastic Engineers,* 2015/17/01, http://www.4spepro.org/

[18] *ASM Metal Handbooks,* Volume 8, Mechanical Testing and Evaluation.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.6.40.6]