

شکل (۱۰) مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج نرم افزار ANSYS.

جدول (۱) نتایج آزمایش دینامیکی.

دامنه ورودی (mm)	فرکانس (Hz)	دامنه نیروی دینامیکی F'_0 (kg)	دامنه نیروی دینامیکی لوله $F_0 = \frac{135}{122} F'_0$ (kg)	دامنه تغییر مکان گره اولی u_0 (mm)	مقدار سختی عددی دینامیکی $\frac{F_0}{u_0}$ (kg/mm)	مقدار متوسط سختی دینامیکی
۱	۰/۵	۷/۶	۸/۴	۰/۰۱۱	۷۶۳	۸۲۸
۲		۱۵/۱	۱۶/۷	۰/۰۲۵	۶۶۸	
۴		۲۹/۲	۳۲/۳	۰/۰۳۵	۹۲۲	
۸		۴۵/۱	۴۹/۹	۰/۰۵۲	۹۵۹	
۱	۱/۰	۹/۳	۱۰/۳	۰/۰۱۵	۶۸۷	۷۰۵
۲		۱۳/۱	۱۴/۵	۰/۰۲۱	۶۹۱	
۴		۱۷/۳	۱۹/۱	۰/۰۲۸	۶۸۲	
۸		۲۸/۲	۳۱/۲	۰/۰۴۱	۷۶۱	
۱	۲/۰	۸/۴	۹/۳	۰/۰۱۵	۶۲۰	۶۳۲
۲		۹/۵	۱۰/۵	۰/۰۲۰	۵۲۵	
۴		۱۷/۶	۱۹/۵	۰/۰۲۸	۶۹۶	
۸		۲۴/۸	۲۷/۵	۰/۰۴۰	۶۸۸	
۱	۴/۰	۵/۱	۵/۶	۰/۰۱۲	۴۶۷	۵۲۲
۲		۷/۱	۷/۹	۰/۰۱۵	۵۲۷	
۴		۹/۴	۱۰/۴	۰/۰۱۸	۵۷۸	
۸		۱۴/۵	۱۶/۰	۰/۰۳۱	۵۱۶	

مراجع

- [1] D. G. Honegger and P. B. Summer (1984), "Wave propagation effects on buried pipelines", American Society of Civil Eng., New York.
- [2] C. H. Lon, Y. S. Hwang (1989), "Pipeline response to spatial variation of seismic waves", P. V. P., Vol. 162, pp. 145-150.
- [3] F. Y. Cheng, J. F. Ger (1989), "Response analysis of 3-D pipeline structures with consideration of fix component seismic input", P. V. P., Vol. 162, pp. 216-226.
- [4] L. R. L. Wang, K. M. Cheng (1979), "Seismic response behavior of buried pipelines", Jour. Pressure Vessel Tech., v. 101, pp. 21-30.
- [5] S. Takada, K. Tanabe (1985), "Three dimensional

- response analysis of buried continuous or jointed pipeline", P. V. P., Vol, 98-4, pp.35-42.
- [6] E. C. Gooding (1985), "Uncertainties in seismic analysis of buried piping", P. V. P., Vol, 98-4, pp.173-184.
- [7] K. E. Hmadi and M. J. O'Rourke (1988), "Soil springs for buried pipelines axial motion", Jour. Geotech. Eng., Vol. 114, No. 11, pp. 1335-1339.
- [8] L. R. L. Wang, Y. H. Yeh (1989), "Combined effects of soil liquefaction and ground displacement to buried pipeline", P. V. P. vol. 162, pp. 43-51.
- [9] C. Singhal (1980), "Strength characteristics of buried jointed pipelines", Report to the Engineering Foundation and ASCE, Grant No. RC-A-77-6A.
- [10] A. Davis and J. P. Bardet (2000), "Responses of buried corrugated metal pipes to earthquakes", Jour. Geotech. and Geoenv. Eng., Vol. 126, No. 1, pp. 28-39.
- [11] M. J. Paulin, A. Trigg, R. Phillips, S. Hurley and J. I. Clark (1997), "A Full-Scale investigation into Axial pipeline/Soil Interaction in clay", 50th Canadian Geotechnical Conference, pp. 782-789.
- [۱۲] میرزاگل تبار روشن، علیرضا، رساله دکتری مهندسی عمران گرایش سازه «زیر نظر دکتر حسین رجائی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی عمران، زمستان ۷۹».

آنالیز ضربه عرضی یک جسم متحرک بر روی صفحه ارتوتروپیک و بررسی بعضی از پارامترهای مؤثر در آن

سید محمد رضا خلیلی
استادیار

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

چکیده

در مقاله حاضر، واکنش صفحات ارتوتروپیک در برابر بار ضربه ای عرضی یک جسم متحرک به صورت تئوری و در قالب نیروی ضربه ایجاد شده و نیروی جنبش دهنده وارد به صفحه مورد بررسی قرار گرفته است. آنالیز در محدوده رفتار ارتجاعی خطی در ماده در نظر گرفته شده است. نیروی جنبش دهنده مستقیماً با خیز صفحه در زیر محل برخورد تناسب دارد. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که واکنش کامل بوسیله پارامتری بنام پارامتر ضربه λ قابل تعریف می باشد. ضریب برگشت پذیری، حداکثر نیروی ضربه و زمان تماس بین صفحه و ضربه زننده در قالب λ براحتی تعریف می گردد. در تحقیقات حاضر تغییرات انرژی ضربه نیز مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج بدست آمده با نتایج حاصل از کارهای محققین در گذشته مقایسه و بررسی گردیده اند. نهایتاً برای یک لایه اپوکسی تقویت شده به الیاف شیشه در قالب پارامتر بدست آمده، نقش کسر حجمی الیاف و پارامترهای ضربه زننده مانند جرم، سرعت و انرژی جنبشی آن بررسی شده و نتایج ترسیم گردیده اند.

کلمات کلیدی

کامپوزیت، ارتوتروپیک، ضربه عرضی، نیروی ضربه، انرژی ضربه، پارامتر ضربه

Transverse Impact Analysis of a Moving Body on Orthotropic Plate and Study the Influence of the Effective Parameters

S. M.R. Khalili

Assistant Professor

Mechanical Department,

K. N. T. University of Technology

Abstract

In the present paper, the response of orthotropic plates to transverse impact load due to moving body have been studied theoretically in terms of the induced impact load and the impulse imparted to the plate. The analysis assumes linear elastic behaviour of the material. The impulse is directly proportional to the deflection under the point of impact. The results obtained shown that the complete response is described by a single parameter called impact parameter λ . The coefficient of restitution, maximum impact force, and time of contact between the impactor and the plate can be easily determined in term of λ . The variation of the energy of impact is also considered and the approximate expressions used by others discussed. Finally, for a glass fibre reinforced epoxy lamina, the roles of the volume fraction of fibres and the impactor parameters such as its mass, velocity and kinetic energy are ascertained and useful conclusions drawn.

Keywords

Composite, Orthotropic, Transverse impact, impact force, Impact energy, Impact parameter

مواد کامپوزیت الیافی اولین بار در قسمت حفاظت رادار هواپیما در زمان جنگ جهانی دوم مورد استفاده قرار گرفت و از آن به بعد کاربردهای مهندسی این مواد بطور وسیع گسترده گردید. هم اکنون این مواد غالباً بعنوان سازه های اصلی در هواپیماها، سفینه های فضایی، زیر دریایی ها، کشتی ها، حمل و نقل زمینی و غیره استفاده می شوند. در حقیقت، در همه این کاربردها که وزن پایین در کنار استحکام و سفتی بالا یکی از ملاحظات بسیار مهم است، مواد کامپوزیت از اولین انتخاب ها می باشند. هر چند، استقرار الیافی مانند کولار، کربن، بر یا شیشه در داخل مواد ماتریس باعث تضعیف بعضی از خواص کامپوزیت ها می شود. علت این امر قرار دادن الیاف پیوسته در داخل ماتریس می باشد که ماده کامپوزیت را به یک ماده ارتوتروپیک تبدیل می نماید. ماده ای با خواص متفاوت در امتداد سه جهت عمود بر هم را ماده ارتوتروپیک می نامند. در شکل ۱، یک لایه (Lamina) کامپوزیت الیافی (ارتوتروپیک) که الیاف بسیار ریز بطور منظم و با تراکم هگزاگونالی در کنار هم قرار گرفته اند را مشاهده می نمائید. الیاف بواسطه دارا بودن شکل هندسی باریک و طویل، زمانیکه در ماتریس قرار می گیرند، خصوصیات بسیار مناسب و بالایی را در امتداد طولشان برای ماده کامپوزیتی بدست آمده فراهم می آورند، لیکن در امتدادهای عمود به محور طولی الیاف (صفحه عرضی) خواص ماده کامپوزیت بسیار پایین تر از خواص طولی می باشد. معمولاً کامپوزیت های چند لایه (Laminate) با لایه های متعدد استفاده می شود که در هر لایه الیاف با امتداد معینی جهت جبران بخشی از ضعف خواص عرضی قرار دارند [۱]. لذا چنانچه بارهای عرضی، مانند ضربه عرضی بر این صفحات کامپوزیتی وارد شود، واکنش صفحه در برابر این بارها ضعیف می باشد و رخداد ضربه باعث وارد آوردن نیروهای تماسی بسیار بالا بر روی مساحت بسیار کوچک از این مواد می شود و در مدت زمان بسیار کوتاه، تنش های بالا و همچنین تغییر شکل های ارتجاعی و پلاستیکی و بسیاری از واماندگی ها (Failures) ممکن است رخ دهد؛ واماندگی هایی مانند تورق، شکست ماتریس، خرد شدن الیاف و یا جدا شدن الیاف از ماتریس.

خصوصیات ضربه عرضی مواد را می توان به وسیله آزمایش ضربه و زنه افتان برای صفحات تعیین نمود. در آزمایش استاندارد و زنه افتان، صفحه با تکیه گاه ساده می باشد و یک ضربه زننده با جرم معلوم از ارتفاع مشخصی به مرکز صفحه سقوط می کند. انرژی ضربه زننده را می توان بوسیله تغییر در جرم، تغییر در ارتفاع سقوط و بنابراین

سرعت ضربه و همچنین هر دو مورد قبلی با هم تغییر داد. واکنش ضربه مواد را می توان در قالب میزان و ماهیت خرابی (Damage) ایجاد شده در صفحه اندازه گیری کرد. خرابی ایجاد شده را نیز می توان با استفاده از روش های آزمایش غیر مخرب مشاهده نمود. در بعضی از آزمایش های ضربه، ضربه زننده را توسط وسایل الکترونیکی پیشرفته تجهیز می نمایند تا ماهیت نیروی ضربه ایجاد شده در خلال ضربه را بدست آورند. همچنین کار انجام شده توسط ضربه زننده در خلال ضربه را می توان بطور تقریب اندازه گیری کرد و بنابراین انرژی انتقال یافته به صفحه را بدست آورد. این انرژی باعث بسیاری از خرابی ها در صفحه می شود. قاسمی نژاد و همکارانش [۲] و همچنین ردین و همکارانش [۳] آزمایشات متفاوتی را بر روی صفحات کامپوزیت الیافی در ترازهای متفاوت انرژی و با سرعت های مختلف ضربه انجام داده اند. از تحقیقات فوق نتیجه گرفته شد که هر چند اثر سرعت ضربه قابل توجه نمی باشد، لیکن انرژی ضربه تأثیر بسزایی در واکنش و کارایی صفحات در برابر ضربه دارد. این امر باعث شد تا در تحقیقات حاضر، با استفاده از یک روش تحلیلی [۴، ۵، ۶] برای حل واکنش ضربه عرضی صفحات ارتوتروپیک ارتجاعی، معادلات لازم برای کسر حجمی الیاف در صفحات و پارامترهای اصلی ضربه زننده یعنی جرم، سرعت و انرژی جنبشی ضربه زننده بدست آید و تأثیر آنها مورد بررسی قرار گیرد. تاکنون، تحقیقات زیادی بر روی ضربه و پاسخ دینامیکی صفحات کامپوزیتی بصورت تحلیلی، عددی و تجربی انجام گردیده [۷، ۸، ۹، ۱۰]، ولی اثر پارامترهای ضربه در پاسخ دینامیکی کامپوزیت ها بیشتر با روش های تجربی [۲، ۳، ۱۰، ۱۱، ۱۲] و در بعضی موارد روش های عددی [۱۲، ۱۳] مورد بررسی قرار گرفته و تاکنون بررسی این اثرات بصورت تحلیلی مشاهده نشده است. چون صفحه به صورت ارتوتروپیک فرض شده، واضح است که نتایج این تحقیق را می توان مستقیماً برای صفحات کامپوزیتی تقویت شده به الیاف پیوسته تک جهته استفاده نمود. همچنین در منابع دیگر [۵، ۱۴] نشان داده شده است که همین معادلات حاکم، برای صفحات چند لایه متقارن کاربرد دارد به شرطی که $D_{16} = D_{26} = 0$ در نظر گرفته شود، یعنی صفحات چند لایه متقارن عمود برهم که جهت الیاف در هر لایه عمود بر جهت الیاف در لایه دیگر است. چون پلیمرهای تقویت شده با الیاف پیشرفته مانند گرافیت، کربن یا بر ساخته می شوند، می توان رفتار این صفحات را تا شکست ارتجاعی در نظر گرفت. البته آنالیز فوق رخداد شکست ماتریس، خرد شدن الیاف و تورق

(۴)

جزئیات راه حل معادله (۱) در مراجع [۶، ۵] ارائه گردیده است. بنابراین، خیز صفحه بوسیله معادله زیر ارائه می شود:

$$w(x,y,t) = \frac{3}{\pi^2 \sqrt{\rho h}} \int_0^t F(\tau) \int_0^{\pi/2} \int_0^\infty \cos(x\rho \cos\phi) \cos(y\rho \sin\phi) g(\Lambda) \times \frac{\sin \omega(t-\tau)}{\omega} \rho d\rho d\phi d\tau \quad (5)$$

که

$$\omega = \frac{p^2}{\sqrt{\rho h}} \sqrt{D_1 \cos^4 \phi + 2D_3 \sin^2 \phi \cos^2 \phi + D_2 \sin^4 \phi} = \frac{p^2}{\sqrt{\rho h}} \phi \quad (6)$$

$$g(\Lambda) = \frac{1}{\Lambda^2} \left[\frac{\sin \Lambda}{\Lambda} - \cos \Lambda \right] \quad (7)$$

$$\Lambda = p \sqrt{a^2 \cos^2 \phi + b^2 \sin^2 \phi} \quad (8)$$

در راه حل بالا، ویژگی خاص در این است که نیروی ضربه نه بصورت متمرکز در یک نقطه در نظر گرفته شده بطوریکه در تحقیقات [۱۷، ۱۶، ۱۵] می باشد و نه به اختیار، شکل و اندازه منطقه تماس انتخاب گردیده بطوریکه در تحقیقات [۱۸] انجام شده است. در کار حاضر، منطقه تماس و توزیع فشار تماس $f(x,y)$ از تئوری تماس اسوکلو [۱۹] برای دو جسم غیر ایزوتروپیک تحت فشار بدست آمده است. بر طبق این تئوری، نیروی تماس بر روی منطقه بیضی شکل با نیم محوره های اصلی a و b توزیع می گردد، شکل ۱، و این توزیع نیروی تماس به صورت زیر ارائه شده است:

$$f(x,y) = \frac{3F}{2\pi ab} \left[1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} \right]^{1/2} \quad (9)$$

این نتیجه از تئوری اسوکلو با تئوری کلاسیک هرتز [۲۰] که برای اجسام ایزوتروپیک در تماس ارائه شده، مشترک است. بعلاوه، قانون تماس اسوکلو برای اجسام غیر ایزوتروپیک شبیه به قانون هرتز است، یعنی:

$$F = K\delta^{3/2} \quad (10)$$

پارامتر K می بایست از طریق روش عددی پیچیده [۲۱، ۵] بدست آید. البته K برای اجسام ایزوتروپیک بسادگی تعیین می گردد [۲۲، ۱۶]. اثر مساحت غیر صفر تماس بوسیله تابع $g(\Lambda)$ در معادله

را در نظر نمی گیرد. بنابراین نتایج بدست آمده در این تحقیق مانند $F(t)$ ، F_{max} و t_c تا شروع این عیوب اعتبار خواهند داشت. یکی از ویژگی های آنالیز حاضر این است که کل واکنش ضربه در قالب پارامتر λ بدست می آید که خود بستگی به سفتی های خمشی صفحه و جرم و سرعت ضربه زننده دارد. به لحاظ اینکه در طراحی سازه های مواد کامپوزیت، ν_r یکی از پارامترهای مهم می باشد، در کار حاضر نقش این پارامتر را بوسیله ارائه دادن سفتی های خمشی در قالب ν_r بوضوح نشان داده ایم. نهایتاً، واکنش صفحه کامپوزیتی تقویت شده به الیاف شیشه را در ضربه عرضی مورد بررسی قرار داده و اثرات کسر حجمی الیاف، جرم، سرعت و انرژی جنبشی ضربه زننده را بدست آورده ایم.

معادله حرکت و خیز صفحه

یک صفحه ارتوتروپیک بزرگ را که در معرض ضربه عرضی مطابق با شکل ۱ قرار گرفته است در نظر بگیرید. محوره های (x,y,z) دستگاه مختصات، با جهات اصلی ماده بر هم منطبق می باشند و مبداء سیستم مختصات در مرکز منطقه تماس قرار دارد. برای صفحه تقویت شده به الیاف، محور x محور طولی الیاف یعنی محور ۱ و محور y امتداد عرض الیاف در صفحه کامپوزیت یعنی محور ۲ بر روی سطح میانی می باشند. صفحه همگن و با ضخامت یکنواخت h و دانسیته ρ است. معادله حرکت این صفحه ارتوتروپیک که در معرض نیروی $f(x,y,t)$ قرار گرفته بوسیله معادله زیر ارائه می شود [۱۴، ۵].

$$D_1 \frac{d^4 w}{dx^4} + 2D_3 \frac{d^4 w}{dx^2 dy^2} + D_2 \frac{d^4 w}{dy^4} + \rho h \frac{d^2 w}{dt^2} = f(x,y,t) \quad (1)$$

معادله (۱) بر پایه تئوری کلاسیک صفحه می باشد و بنابراین اثرات اینرسی چرخشی و برش عرضی نادیده گرفته شده است. در معادله بالا سفتی های خمشی و پیچشی صفحه D_1 ، D_2 و D_3 به صورت زیر تعریف می گردند:

$$D_1 = D_x = \frac{E_1 h^3}{12(1-\nu_{12}\nu_{21})} \quad (2)$$

$$D_2 = D_y = \frac{E_2 h^3}{12(1-\nu_{21}\nu_{12})} \quad (3)$$

$$D_3 = D_{12} + 2D_{66} = \frac{1}{2} (D_1 \nu_{21} + D_2 \nu_{12}) + \frac{G_{12} h^3}{6}$$

شده توسط صفحه بوسیله معادله زیر ارائه شده است [۳۰]:

$$E(t) = \int_0^t F(\tau) dw_s = \int_0^t F(\tau) w_s^0(\tau) d\tau \quad (29)$$

در بعضی تحقیقات در پدیده ضربه، $E(t)$ بطور تقریب آورده شده است [۲۹]:

$$E(t) \sim E_a(t) = v_0 \int_0^t F(\tau) d\tau = v_0 I(t) \quad (30)$$

بعبارت دیگر، $E(t)$ با نیروی جنبش دهنده وارد به صفحه تناسب دارد. در بعضی تقریبات اصلاح شده، سرعت اولیه v_0 بوسیله سرعت میانگین جایگزین می گردد، یعنی:

$$E(t) \sim E^*(t) = v_{ave} \int_0^t F(\tau) d\tau \quad (31)$$

بنابراین، $E(t)$ دوباره متناسب با نیروی جنبش دهنده وارد به صفحه فرض شده است:

در کار حاضر با استفاده از روش تحلیلی [۵]، معادله تعیین انرژی ضربه را در قالب λ بدست آورده ایم. چون سرعت ضربه زننده توسط معادله زیر ارائه می گردد:

$$w_s^0(t) = v_0 - \frac{1}{m_s} \int_0^t F(\tau) d\tau \quad (32)$$

انرژی ضربه $E(t)$ پس از ساده سازی بوسیله معادله زیر تعیین می شود:

$$E(t) = v_0 I(t) - \frac{1}{m_s} \int_0^t F(\tau) I(\tau) d\tau \quad (33)$$

فرم بی بعد معادله (۳۳) توسط معادلات (۲۱)، (۲۲) و (۲۳) به صورت معادله (۳۴) می شود:

$$E' = \frac{E}{m_s v_0^2} = \left[\int_0^t f(\tau) d\tau - \int_0^t f(\tau) \int_0^{\tau} f(\tau^*) d\tau^* d\tau \right] \quad (34)$$

برای یک پالس مستطیلی مطابق زیر:

$$F(t) = F_0, \quad t \leq T_c \quad (35)$$

$$F(t) = 0, \quad t > T_c$$

معادله (۳۳) می شود:

$$E(t) = F_0 t \left[v_0 - \frac{F_0 t}{2m_s} \right] = v_{ave} I(t) \quad t \leq T_c$$

$$E(t) = F_0 T_c \left[v_0 - \frac{F_0 T_c}{2m_s} \right] = v_{ave} I(t) \quad t > T_c \quad (36)$$

بنابراین، برای بارگذاری پالس مستطیلی، معادله (۳۱) معتبر است. هر چند، برای پالس نیم سینوسی، این اعتبار بدست نمی آید، یعنی وقتی که:

$$F(t) = F_0 \sin \frac{\pi t}{T_c} \quad t \leq T_c \quad (37)$$

$$F(t) = 0 \quad t > T_c$$

انرژی ضربه می شود:

$$E(t) = \left[\frac{v_0 F_0 T_c}{\pi} - \frac{F_0^2}{m_s} \left(\frac{T_c}{\pi} \right)^2 \right] \left[1 - \cos \frac{\pi t}{T_c} \right] + \frac{F_0^2}{m_s} \left(\frac{T_c}{2\pi} \right)^2 \left[1 - \cos \frac{2\pi t}{T_c} \right] \quad t \leq T_c$$

$$E(t) = \frac{2F_0 T_c}{\pi} \left[v_0 - \frac{F_0 T_c}{m_s \pi} \right] = v_{ave} I(t) \quad t > T_c \quad (38)$$

بنابراین معادله (۳۱) اعتبار محدودی برای پالس نیم سینوسی دارد. ترسیم معادلات (۳۶) و (۳۸) در شکل ۷ می باشد. در این شکل نیرو، نیروی جنبش وارده و انرژی، بی بعد گردیده اند. منحنی انرژی-زمان برای پالس سینوسی یک برآمدگی واضحی را نشان می دهد که در نتایج تجربی [۲] نیز گزارش گردیده است.

نتایج بدست آمده و بحث

آنالیز بالا برای هر صفحه کامپوزیتی که دارای تقویت کننده های الیافی پیوسته و هم امتداد باشد، قابل بکارگیری است. بعنوان مثال در کار حاضر، کامپوزیت لایه ای الیاف شیشه در ماتریس اپوکسی در نظر گرفته شده است. مرحله اول در ترسیم واکنش آزمایش ضربه، محاسبه ثابت های لایه برای کسرهای حجمی متفاوت است. برای این منظور، خواص ارتجاعی الیاف شیشه و ماتریس بکار برده شده در کامپوزیت، در زیر در نظر گرفته شده است. برای الیاف (شیشه): مدول ارتجاعی 78GPa، نسبت

دارد. به خاطر درک بهتر از تأثیر ν_f بر α_p ، یک پارامتر جدید α_p^* معرفی می شود:

$$\alpha_p^* = h^2 \alpha_p = \frac{F\left(\frac{\pi}{2}, \bar{K}\right)}{2\pi \sqrt{\frac{\rho \sqrt{E_1 E_2}}{3(1-\nu_{12}\nu_{21})}}} \quad (39)$$

شکل ۱۰ تغییرات α_p^* را با ν_f نمایش می دهد. با تعیین K و α_p^* ، نهایتاً می توان λ را که به تنهایی واکنش ضربه را کنترل می نماید، بدست آورد. معادله λ یعنی معادله (۲۳) را می توان به صورت زیر دوباره نویسی کرد:

$$\lambda = \frac{(\alpha_p^* K^{2/5}) (v_0 m_s^3)^{1/5}}{h^2} = \frac{\lambda_I \lambda_{II}}{h^2} \quad (40)$$

عبارات در پرانتز اول با λ معرفی می شوند و بستگی به کسر حجمی دارند، در صورتیکه عبارات دیگر، یعنی λ_{II} و h^2 غیر وابسته به ν_f هستند. بنابراین، تأثیر ν_f بر روی واکنش ضربه بسادگی قابل تشخیص است. بطور مشابه، نقش جرم و سرعت ضربه زننده بعلاوه ضخامت صفحه مستقیماً از معادله (۴۰) قابل درک است. شکل ۱۰ تغییرات λ و ν_f را نیز نمایش می دهد.

پواسون ۰/۲۲، دانسیته 2540 kg m^{-3} می باشد.

برای ماتریس (اپوکسی): مدول ارتجاعی 3 GPa، نسبت پواسون ۰/۳۵، دانسیته 1500 kg m^{-3} می باشد.

از طریق مدل های ارائه شده در مکانیک مواد مرکب [۳۱]، سفتیهای مواد تعیین گردیده اند. نتایج بعضی از محاسبات در شکل ۸ آورده شده است.

مرحله بعدی در ترسیم واکنش آزمایش ضربه، محاسبه نمودن پارامترهای تماس است، یعنی، K ، نامدوری E و اندازه a یا b بیضی تماس. برای یک صفحه ایزوتروپیک این محاسبات خیلی ساده می باشد و در مراجع متفاوت آورده شده است [۲۲، ۲۱، ۱۶، ۵]، ولی برای یک صفحه ارتوتروپیک روش پیچیده تر می باشد. ضربه زننده یک گلوله فولادی با خواص ارتجاعی زیر است، $E=211 \text{ GPa}$ ، $G=82.46 \text{ GPa}$ و $\nu=0.28$. جزئیات در مرجع [۵] ارائه شده است. برای این محاسبات یک برنامه نویسی کامپیوتری انجام گردیده و نتایج به صورت ترسیمی در شکل ۹ نشان داده شده است.

تمامی این پارامترها در قالب ν_f ترسیم گردیده اند. بعد از تعیین پارامتر K ، محاسبه بعدی شامل تعیین نمودن α_p با استفاده از معادله (۱۶) و (۱۷) می باشد. در تعیین \bar{K} که برای α_p نیاز است، بسادگی قابل تشخیص است که ضخامت صفحه اثری ندارد. بنابراین α_p بطور معکوس با h^2 تناسب

جدول (۱) محاسبه کمیت های متعدد ضربه برای کسرهای حجمی مختلف الیاف.

ν_f	λ	F_{max} (N)	t_c (μs)	I_{max} (Ns)	E_{max} (J)	w_{max} (μm)
۰/۰	۳/۴۴۵۰	۱۴۴/۷۶	۴۰۱۴/۱۷	۰/۱۱۰۱	۰/۰۲۷۱	۳۳۱/۳۸
۰/۱	۳/۱۵۲۵	۱۸۰/۴۵	۲۹۶۳/۳۳	۰/۱۱۰۲	۰/۰۲۷۰	۲۶۹/۴۸
۰/۲	۲/۸۴۷۵	۲۰۴/۵۳	۲۳۷۸/۸۱	۰/۱۱۰۴	۰/۰۲۷۰	۲۲۶/۶۰
۰/۳	۲/۶۴۷۰	۲۳۲/۸۷	۱۹۴۷/۰۰	۰/۱۱۰۶	۰/۰۲۶۹	۱۹۶/۲۳
۰/۴	۲/۵۰۱۳	۲۶۲/۱۹	۱۶۲۷/۳۶	۰/۱۱۰۸	۰/۰۲۶۹	۱۷۲/۲۷
۰/۵	۲/۳۹۰۹	۲۹۴/۳۳	۱۳۸۶/۰۰	۰/۱۱۱۰	۰/۰۲۶۹	۱۵۲/۰۰
۰/۶	۲/۳۰۴۶	۳۳۱/۶۸	۱۱۸۴/۵۰	۰/۱۱۱۲	۰/۰۲۶۹	۱۳۴/۰۰
۰/۷	۲/۲۳۶۳	۳۷۷/۱۵	۱۰۰۳/۶۰	۰/۱۱۱۴	۰/۰۲۶۸	۱۱۷/۱۸
۰/۸	۲/۱۸۰۰	۴۳۷/۳۹	۸۴۵/۶۰	۰/۱۱۱۶	۰/۰۲۶۸	۱۰۰/۵۷
۰/۹	۲/۱۲۳۵	۵۳۰/۳۲	۶۸۰/۵۲	۰/۱۱۱۸	۰/۰۲۶۸	۸۲/۵۵
۱/۰	۱/۹۵۱۱	۷۵۶/۴۸	۴۳۸/۵۳	۰/۱۱۲۷	۰/۰۲۶۷	۵۶/۹۵

$\lambda \leq 2.0$. برای ضربه زننده کوچکتر با شعاع ۱۲ میلیمتر و سرعت پایین 0.25 / متر بر ثانیه، حداکثر نیروی جنبش دهنده $1.256 m_s v_0$ است. هر چند، برای ضربه زننده با شعاع ۱۸ میلیمتر و بزرگتر و همه سرعت ها، نیروی جنبش دهنده خیلی نزدیک به $m_s v_0$ می شود. سرعت بالاتر یا جرم بزرگتر، نزدیکتر بودن حداکثر نیروی جنبش دهنده به $m_s v_0$ است. نهایتاً F_{max} به عنوان تابعی از v_0 برای جرم های مختلف در شکل ۱۱ نشان داده شده است. در همین شکل نیز I_{max} و E_{max} بعنوان تابعی از v_0 نشان داده شده است. رفتار خطی F_{max} و I_{max} در نتایج تجربی [۲۱] تأیید گردیده است.

اثر جرم ضربه زننده

مشاهدات بالا نسبت به برآمدگی قبل از E_{max} و $I_{max} \geq m_s v_0$ برای مقادیر پایین λ در اینجا نیز معتبر است. شکل ۱۲، E_{max} ، I_{max} و F_{max} را به عنوان تابعی از m_s برای v_0 متفاوت نشان می دهد. اثر جرم ضربه زننده بر روی F_{max} نسبتاً در ابتدا قابل توجه است، لیکن F_{max} بتدریج کاهش می یابد و به عکس وابستگی خطی F_{max} به v_0 است.

اثر انرژی جنبشی ضربه زننده

اثر m_s و v_0 را می توان بوسیله انرژی جنبشی ضربه زننده به عنوان پارامتر حاکم، ترکیب کرد. هر دو I_{max} و F_{max} در شکل ۱۳ به عنوان تابعی از انرژی جنبشی ضربه زننده دقیقاً قبل از رخداد ضربه نشان داده شده است.

نتیجه گیری

آنالیز ارتجاعی صفحه کامپوزیت الیافی پیوسته (ارتوتروپیک) در معرض ضربه عرضی بواسطه یک جرم متحرک با استفاده از روش تحلیلی مناسب [۵] نشان می دهد که واکنش صفحه کاملاً بوسیله یک پارامتر بنام λ تعریف می شود. در تحقیقات حاضر نشان داده شده است که این پارامتر مؤلفه λ_1 دارد که وابسته به کسر حجمی v_f است، در صورتیکه مؤلفه دیگر λ_{11} می باشد که وابسته به سرعت، جرم ضربه زننده و ضخامت صفحه می باشد. واکنش صفحه در قالب کمیت های بی بعد تعریف گردیده و اثر λ بر این کمیت ها مطالعه گردیده است. تأثیر کسر حجمی تقویت کننده بر حداکثر نیروی ضربه، حداکثر خیز مرکزی، و حداکثر انرژی ضربه بطور کامل بررسی گردیده و نتایج مفیدی برای طراحان بدست آمده است. همچنین نقش پارامترهای ضربه زننده مانند جرم، سرعت و انرژی جنبشی بطور جداگانه بحث گردیده است.

کسر حجمی الیاف شیشه در صفحه ای به ضخامت ۸ میلیمتر از ۰ (برای اپوکسی خالص) تا ۱ (فقط الیاف شیشه) تغییر می کند. لیکن بطور واقع v_f از ۰/۷ تجاوز نمی کند. جرم ضربه زننده ۰/۲۲ کیلوگرم و سرعت آن ۰/۵ متر بر ثانیه است. شعاع انحناء دماغه ضربه زننده در نزدیکی تماس ۱۷/۷ میلیمتر می باشد. این اطلاعات از مرجع [۵] گرفته شده است. محاسبات بر پایه این اطلاعات در جدول ۱ آورده شده است. از جدول مشاهده می شود که برای یک ضربه زننده مشخص با سرعت معلوم، نتایج زیر حاصل می گردد:

- ۱- حداکثر نیروی ضربه تابع فزاینده در v_f است. وقتی v_f از ۰/۱ تا ۰/۷ افزایش می یابد، این نیرو بیش از ۱۰۰٪ افزایش دارد.

- ۲- حداکثر نیروی جنبش دهنده وارد به صفحه تقریباً با مقدار ۰/۱۱ نیوتن ثانیه ثابت است که برابر با $m_s v_0$ می باشد.
- ۳- حداکثر خیز در زیر محل ضربه تابع کاهنده در v_f است. چنانچه v_f از ۰/۱ تا ۰/۷ تغییر کند، این خیز تقریباً بیش از ۵۰٪ کاهش می یابد.

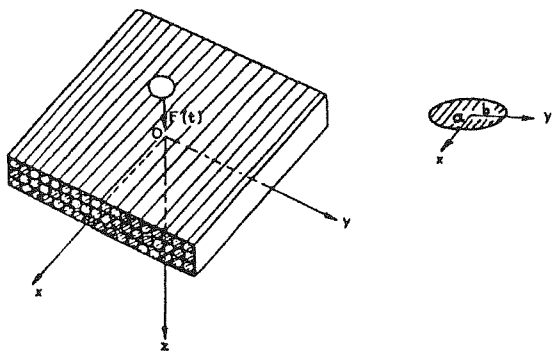
- ۴- حداکثر انرژی ضربه انتقال یافته به صفحه بوسیله ضربه زننده تقریباً ثابت است و مقدار آن خیلی نزدیک به $\frac{m_s v_0^2}{2}$ می باشد، یعنی انرژی جنبشی ضربه زننده.

- ۵- زمان تماس پیوسته کاهش می یابد. مقدار آن برای کسر حجمی ۰/۷ یک سوم کسر حجمی ۰/۱ است. برای یک صفحه با کسر حجمی مشخص ۰/۶، مناسب است تا نقش سه پارامتر ضربه زننده را بررسی کنیم، یعنی جرم، سرعت و انرژی جنبشی ضربه زننده. در نتیجه ضربه زننده های متفاوتی با شعاع های مختلف و سرعت های مختلف در نظر گرفته شده است. نتایج به صورت زیر می باشد.

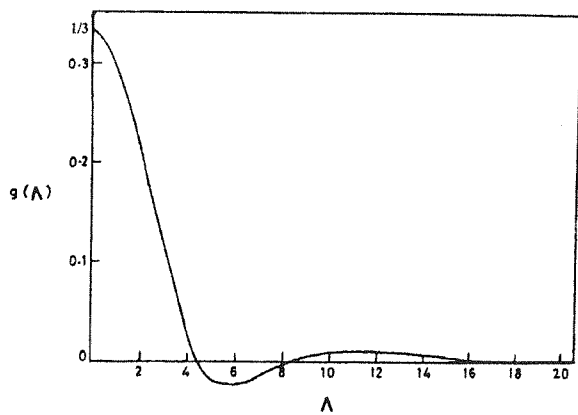
اثر سرعت ضربه زننده

وقتی سرعت تغییر کند، ولی جرم ضربه زننده ثابت باشد، انرژی وارد به صفحه با زمان افزایش می یابد و به مقدار ماکزیمم $E_{max} = \frac{m_s v_0^2}{2}$ می رسد. در اکثر حالات این پدیده با آرامی رخ می دهد، هر چند وقتی جرم و سرعت ضربه زننده کوچک باشد، بطوریکه $\lambda \leq 1.7$ باشد، یک برآمدگی واضح قبل از رسیدن به مقدار $\frac{m_s v_0^2}{2}$ بوجود می آید. این پدیده مشابه با حالتی است که در شکل ۷ برای بارگذاری پالس نیم سینوسی نشان داده شده است. اوج برآمدگی با افزایش λ کاهش می یابد. در همه حالات نقطه اوج برآمدگی خیلی بعد از رخداد F_{max} اتفاق می افتد. حداکثر نیروی جنبش دهنده وارد به صفحه دوباره بوسیله $I_{max} = m_s v_0$ ارائه می شود، به غیر از

و صفحه	
سرعت ضربه زننده	v_0
کسر حجمی الیاف	v_f
خیز سطح میانی صفحه	$w(x,y,t)$
تغییر مکان ضربه زننده	w_s
پارامتر صفحه	α_p
پارامتر صفحه با توجه به ضخامت واحد صفحه	α_p^*
تقریب نسبی بین اجسام در تماس	δ
ضریب نامدوری بیضی تماس	ϵ
پارامتر ضربه	λ
نسبت پواسون مواد ایزوتروپیک	ν
دو نسبت پواسون صفحه کامپوزیت در سطح میانی	ν_{21} و ν_{12}
دانسیته ماده صفحه	ρ



شکل (۱) یک لایه ارتوتروپیک در معرض ضربه عرضی. جزئیات سطح تماس نیز نشان داده شده است.

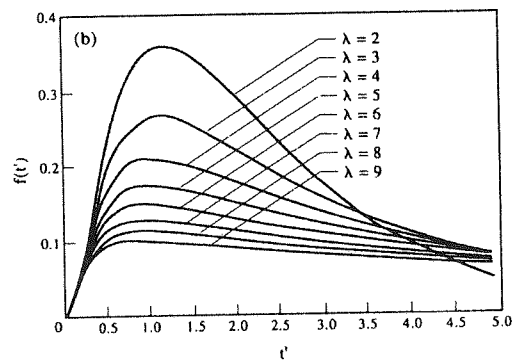
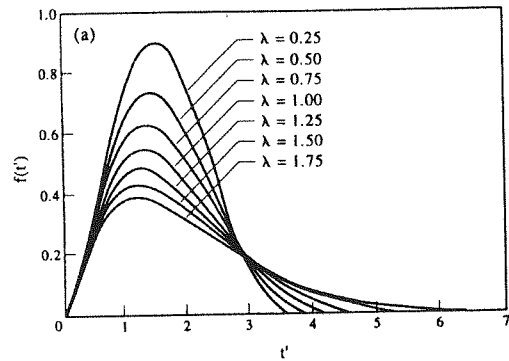
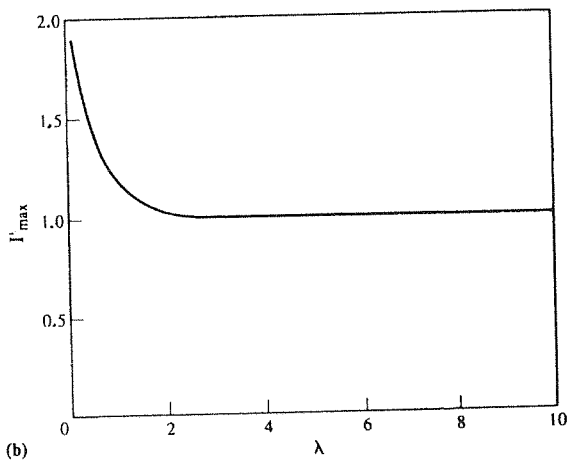
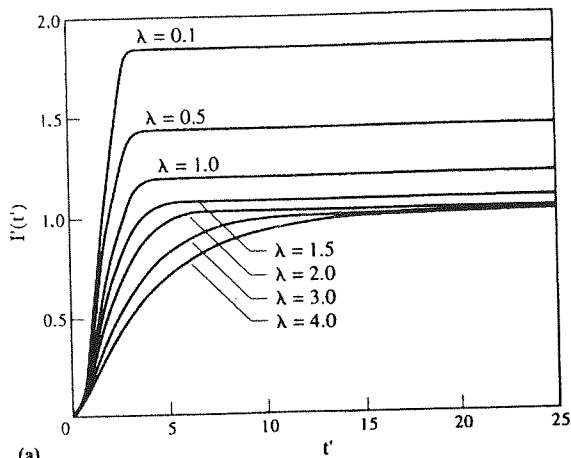


شکل (۲) تغییرات تابع $g(\lambda)$ با λ .

برای مقادیر پایین λ که سرعت پایین یا جرم پایین ضربه را نشان می دهد، افزایش های غیر منتظره ای در انرژی ضربه و نیروی جنبش دهنده وارد به صفحه مشاهده گردیده است که نشان می دهد ضربه با λ پایین، خرابی های قابل توجهی وارد می کند. نهایتاً، می توان تنش ها و کرنش های خمشی در زیر محل ضربه را نیز محاسبه نمود. بوضوح می توان اظهار نمود که λ در تعیین حداکثر تنش ها و کرنش ها بسیار مؤثر است.

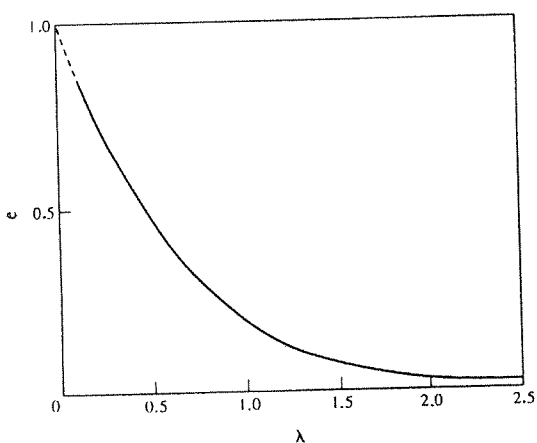
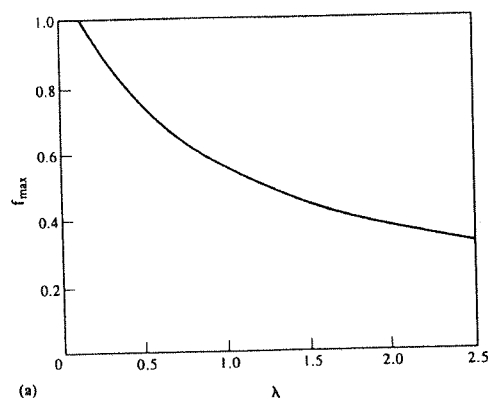
فهرست علائم

D_2 و D_1	سفتی های خمشی صفحه به ترتیب در امتداد و عمود بر جهت الیاف
D_3	سفتی پیچشی مؤثر صفحه
D_{16} و D_{26}	کوپل خمشی - پیچشی
E	مدول ارتجاعی مواد ایزوتروپیک
$E(t)$	انرژی جذب شده بوسیله صفحه در هر زمان
E_{max}	حداکثر انرژی جذب شده بوسیله صفحه
E_2 و E_1	مدول ارتجاعی صفحه کامپوزیت در امتداد و عمود بر جهت الیاف
$F(t)$	نیروی ضربه
F_{max}	حداکثر نیروی ضربه
G	مدول برشی مواد ایزوتروپیک
G_{12}	مدول برشی صفحه کامپوزیت در سطح میانی
$I(t)$	نیروی جنبش دهنده
I_{max}	حداکثر نیروی جنبش دهنده
K	پارامتر هرتز - اسوکلو برای تماس
b و a	نیم محورهای اصلی منطقه بیضی تماس
e	ضریب برگشت پذیری بین صفحه و ضربه زننده
f	نیروی بی بعد
$f(x,y,t)$	نیروی ضربه عرضی وابسته به زمان
h	ضخامت صفحه
m_s	جرم ضربه زننده
t_c	زمان تماس
t'	زمان بی بعد
t'_{max}	زمان بی بعد که در آن f'_{max} رخ می دهد
t'_c	زمان بی بعد تماس بین ضربه زننده

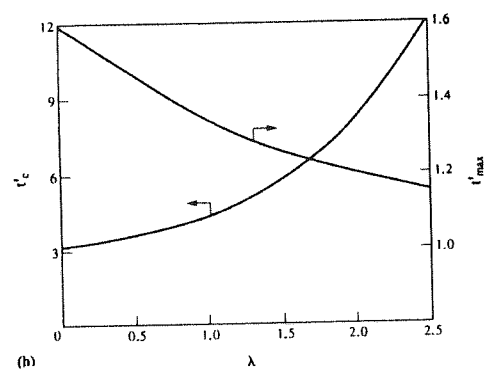


شکل (۳) نیروی بی بعد در مقابل زمان بی بعد برای مقادیر مختلف پارامتر ضربه λ (a) $1/75 \leq \lambda \leq 1/45$ (b) $0 \leq \lambda \leq 4/0$.

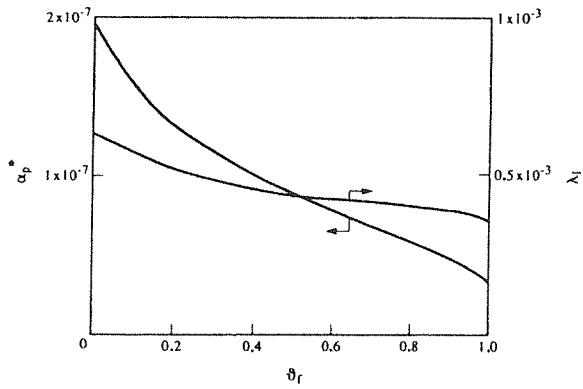
شکل (۵) (a) نیروی جنبش دهنده بی بعد بعنوان تابعی از زمان بی بعد برای مقادیر مختلف λ . (b) وابستگی حداکثر نیروی جنبش دهنده بی بعد به λ .



شکل (۶) وابستگی ضریب برگشت پذیری e به پارامتر ضربه λ .

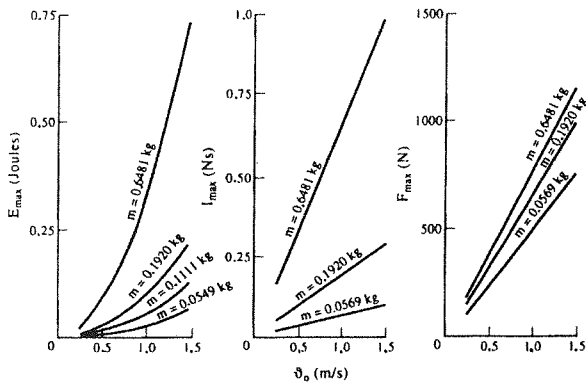


شکل (۴) (a) حداکثر نیروی ضربه بی بعد بعنوان تابعی از پارامتر ضربه. (b) زمان بی بعد تماس t'_c و زمان بی بعد رخداد t'_max بعنوان تابعی از λ .



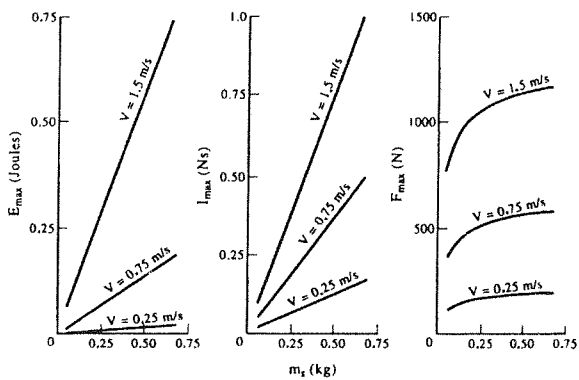
شکل (۱۰) تغییرات پارامتر صفحه با ضخامت واحد

α_p^* و λ_1 بعنوان تابعی از v_r



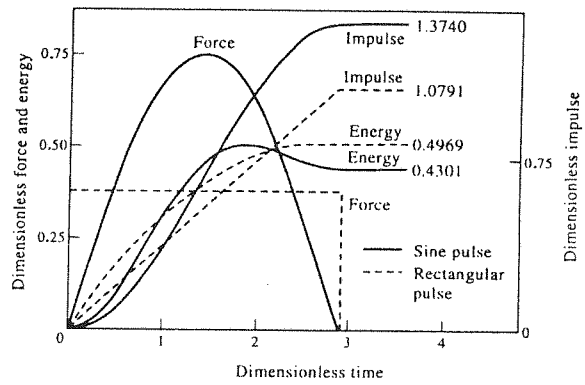
شکل (۱۱) تغییرات E_{max} ، I_{max} ، F_{max} بعنوان تابعی از سرعت

ضربه v_0 برای جرم های مختلف ضربه m_s



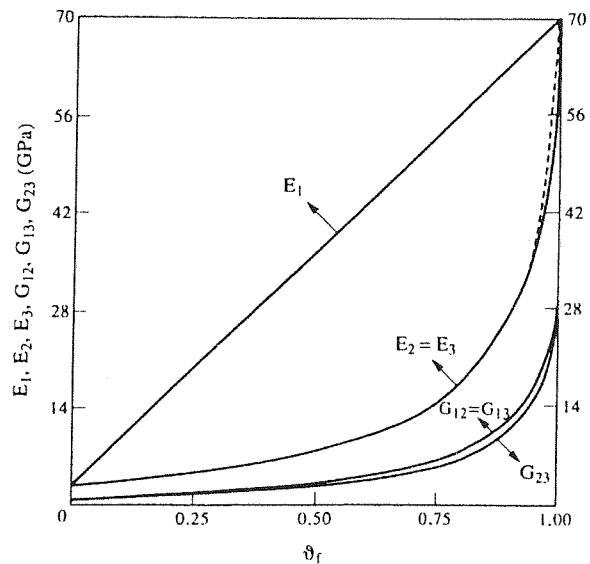
شکل (۱۲) تغییرات E_{max} ، I_{max} ، F_{max} بعنوان تابعی از جرم

ضربه m_s برای سرعت های مختلف ضربه v_0



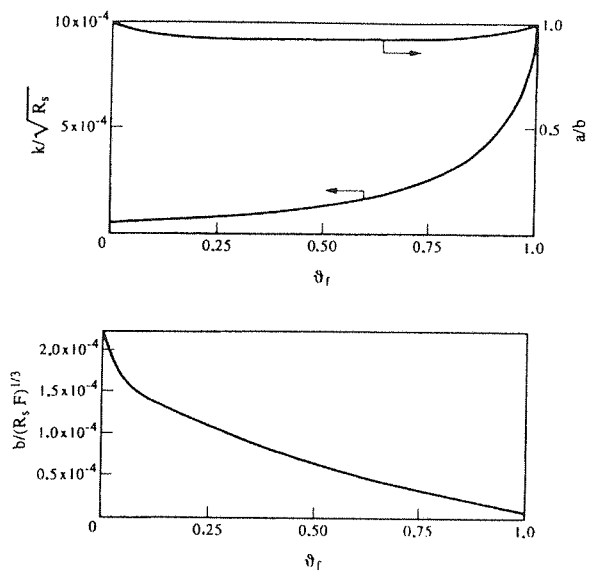
شکل (۷) تغییرات نیرو، نیروی جنبش دهنده و انرژی با زمان

برای پالس مستطیلی (—) و پالس نیم سینوسی (-)

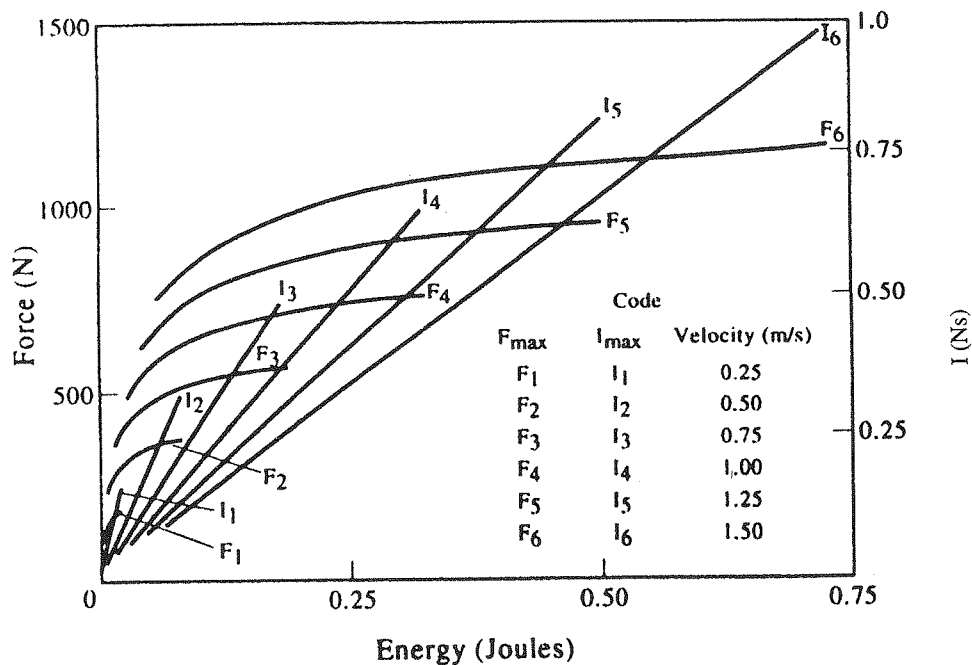


شکل (۸) تغییرات ثابت های ارتجاعی کامپوزیت ابوکسی تقویت شده به

الیاف شیشه بعنوان تابعی از کسر حجمی الیاف.



شکل (۹) وابستگی پارامترهای مختلف تماس به کسر حجمی الیاف.



شکل (۱۳) وابستگی حداکثر نیروی ضربه و حداکثر نیروی جنبش دهنده به انرژی جنبشی ضربه زننده برای مقادیر مختلف سرعت ضربه.

مراجع

- [1] Hyer, M. W., McGraw-Hill, 1998.
- [2] Ghasemi Nejhadi, M.N. & Parvizi-Mazidi, J. Composites, 21, 1990, 155.
- [3] Rydin, R.W., Bushman, M.B. & Karbhari, V.M., J. Reinforced Plastics & Composites, 14, 1995, 113.
- [4] Mittal, R.K. & Khalili, M.R., J. AIAA, 32, 1994, 850.
- [5] Khalili, M.R., Ph.D. Thesis, I.I.T., New Delhi, 1992.
- [6] Mittal, R.K. & Khalili, M.R., ASCE Publishers, New York, 1993, 94.
- [7] Abrate, S., Key Engineering Materials, Vols. 141-143, 1998, 671.
- [8] Carvalho, A. & Guedes Soares, C., Composite Structures, 34, 1996, 55.
- [9] Abrate, S., Cambridge University Press, 1998.
- [10] Kim, J.K. & Kang, K.W., Composite Science & Technology, 61, 1, 2001, 135.
- [11] Choi, H.Y., Wang, H.S. & Chang, F.K., J. of Composite Materials, 26, 6, 1992, 804.
- [12] Chang, F.K., Choi, H.Y. & Downs, R.J., J. of Composite Materials, 25, 8, 1991, 992.
- [13] Chang, F.K., Choi, H.Y. & Wu, H.Y.T., J. of Composite Materials, 25, 8, 1991, 1012.
- [14] Vinson, J.R. & Sierakowski, R.L., Kluwer Publisher, 1993.
- [15] Mittal, R.K., Int. J. Solids & Structures, 23, 1987, 1191.
- [16] Schwieger, H., Forsch. Ing. -Wes., 40, 1975, 122.
- [17] Mittal, R.K., Schwieger, H. & Truppat, V. J., J. Aero. Soc. India, 28, 1976, 265.
- [18] Dobyns, A.L., J. AIAA, 19, 1981, 642.
- [19] Sveklo, V.A., J. Appl. Math. Mech., 38, 1974, 1023.
- [20] Hertz, H., Joh. Ambrosius Barth, Leipzig, 1895.
- [21] Frischbier, J., Report No. 51, Ruhr Universitat, Bochum, 1987.
- [22] Greszczuk, L.B., John Wiley, New York, 1982.
- [23] Sneddon, I.N., Proc, Camb. Phil. Soc., 41, 1945, 27.
- [24] Mittal, R.K. & Khalili, M.R., Wiley Eastern Ltd., New Delhi, 1993.
- [25] Chow, T.S., J. Composite. Material., 5, 1971, 306.
- [26] Boussinesq, J.N., Gauthier-Villars, Paris, 1885.
- [27] Timoshenko, S.P., Zeitschrift fur Mechanik und Physik, 62, 1913, 198.
- [28] Zener, C., Phys. Rev., 59, 1941, 669.
- [29] Agarwal, B.D. & Broutman, L. J., John Wiley & sons, New York, 1980.
- [30] Sun, C.T., ASTM STP 617, American Soc. for Testing and Materials., Philadelphia, PA, 1977.
- [31] Kriz, R.D. & Stinchcomb, W.W., Exp. Mech., 19, 1979, 41.