

تحلیل نفوذ پرتابه در پانلهای کامپوزیتی پلیمری (FRP) و ارائه مدل جدید

سعید هدایت رسا
کارشناسی ارشد

غلامحسین لیاقت
استاد

هادی شانظری
کارشناسی ارشد
مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

چکیده

در این مقاله مدل جدیدی برای تعیین مقاومت بالستیکی پانل‌های کامپوزیتی پلیمری (FRP) که در کاربردهای زرهی خاص از آنها استفاده می‌شود، ارائه گردیده است. در این مدل با در نظر گرفتن انتشار موج ضربه در زره و تقسیم‌بندی مکانیزم تغییر شکل به دو قسمت موضعی و عمومی، روابطی برای تحلیل نفوذ پرتابه با نوک مخروطی در این گونه زره‌ها ارائه شده است. مقایسه نتایج مدل این مقاله و نتایج تجربی و تحلیلی دیگر محققین، تطابق خوب و قابل قبولی را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی

نفوذ - بالستیک - پرتابه - کامپوزیت - مدل تحلیلی

An Analytical Model for Penetration of FRP Composite Panels by Projectile

G.Liaghat
Professor

S.Hedaiat Rasa
M.Science

H.Shanazari
M.Science
Mechanical Engineering, Tarbiat Modarres University

Abstract

In this paper a new analytical model for penetration of projectile into fiber reinforced plastic (FRP) composite panels is introduced. By deviding the mechanism of target's deformation into two parts, (local and global) and also by using the theory of propagation of impact waves in the target, the penetration and perforation process was analysed.

The theoretical outputs of this model were compared to the experimental and theoretical results of the other investigators and good agreement was observed.

Keyword

penetration - ballistic - projectile - composites - (FRP) Fibre reinforced plastic

لزوم محافظت در مقابل برخورد پرتابه‌ها و ترکشها در میداين نبرد، ايجاد می‌نماید که تجهیزات حفاظتی از جمله خودروها و یا جلیقه‌های ضدگلوله طراحی و ساخته شوند. جنس زره‌های ضدگلوله بایستی در عین سبک بودن دارای ظرفیت جذب انرژی بالایی بوده که لازمه آن استحکام کششی و درصد ازدیاد طول تا حد پارگی بالا و مدول الاستیک پایین می‌باشد. از طرفی هرچه خواص مکانیکی و مقاوم به ضربه جنس زره پایداری بیشتری در مقابل تغییرات شرایط محیطی از جمله دما و رطوبت داشته باشد، بهتر است. الیاف پلیمری ویژه‌ای از نوع (Oriented Polymer) خواص مناسبی از خود نشان داده‌اند که در این بین استفاده از الیاف آرامیدی بخصوص کولار و تی وارون بیشتر رایج می‌باشد. برای بکارگیری پارچه‌های بافته شده از اینگونه الیاف پلیمری در کاربردهای خاص مانند پانلهای مورد استفاده برای ضدگلوله کردن خودروها و دیگر تجهیزات رزمی، آنها را به رزین آغشته می‌کنند. سهولت طراحی زره‌ها و کاهش هزینه تحقیقات آزمایشگاهی، ايجاد می‌کند که تحقیقاتی در زمینه تحلیل تئوریک فرآیند نفوذ انواع پرتابه‌ها در زره‌های مختلف انجام گیرد [۶-۱]. در این مقاله نیز مدلی برای تحلیل نفوذ پرتابه با نوک مخروطی در اهداف کامپوزیتی که از پارچه‌های بافته شده با الیاف پلیمری و آغشته به رزین ساخته شده، ارائه گردیده است که با اصلاح روابط مربوط به کرنش موضعی برای اشکال مختلف هندسی نوک پرتابه قابل تعمیم است. با توجه به ضعف مدل‌های تحلیلی در این زمینه، مدل ارائه شده در این مقاله از نوآوری خاصی برخوردار است.

بررسی بعضی از مدل‌های تئوری

در زمینه نفوذ گلوله در پانلهای کامپوزیتی مدل‌های تئوری زیادی وجود دارند که برخی از آنها تحلیلی و برخی دیگر عددی می‌باشند. در مقایسه‌ای که بین نتایج مدل‌های تئوری و تجربی صورت گرفته است، نتایج عددی تطابق بیشتری با نتایج تجربی داشته‌اند.

مدل پیشنهادی گلد اسمیت^۱ [۷] در سال ۱۹۹۲ نیز با فرض پنج مکانیزم جذب انرژی و تقسیم فرآیند نفوذ به سه مرحله درگیری، نفوذ و خروج پرتابه و همچنین در نظر گرفتن تغییر شکل موضعی و عمومی زره روابطی جهت تحلیل نفوذ پرتابه در پانلهای کامپوزیتی ارائه نموده است.

موری^۲ [۸] در سال ۲۰۰۰ مدلی ارائه کرده است که با محاسبه انرژی جذب شده توسط لایه‌های زره، سرعت حدبالستیک آنرا تخمین می‌زند. ضعف اساسی این مدل [۸] در این است که برای تعیین برخی ورودیهای روابط تحلیلی آن بایستی از مشاهدات تجربی و نتایج عکسبرداری سریع استفاده نمود و با توجه به محدود بودن سرعت عکسبرداری، این مدل تنها قادر به تخمین محدوده‌ای برای حدبالستیک می‌باشد.

ون^۳ [۹] در سال ۲۰۰۱ مدلی پیشنهاد نموده است که بر اساس تقسیم فشار ناشی از برخورد پرتابه روی نمونه به دو قسمت استاتیک و دینامیک و تنها با توجه به تغییر شکل موضعی زره و بدون در نظر گرفتن شرایط مرزی آن، روابطی برای تعیین عمق نفوذ و حدبالستیک زره بدست می‌دهد. در این مدل شرایط هندسی نوک پرتابه در نظر گرفته شده است.

مدل تحلیلی این مقاله

در این بخش سعی شده است تا با توجه به نقاط ضعف مشاهده شده در مدل‌های تحلیلی موجود که مربوط به تعیین مقاومت بالستیکی پانلهای کامپوزیتی FRP می‌باشند، مدلی جدید ارائه شود.

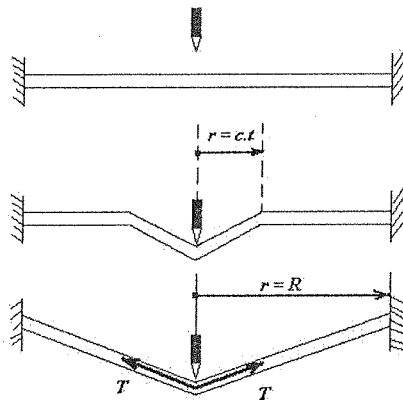
مدل تحلیلی که در این تحقیق ارائه شده است نسبت به مدل‌های موجود در زمینه نفوذ گلوله در لایه‌های FRP از این مزیت و نوآوری برخوردار است که هیچکدام از مدل‌های موجود سه شرط اساسی زیر را با هم دارا نمی‌باشند. این سه شرط عبارتند از:

- در نظر گرفتن تاثیر انتشار موج ضربه در پاسخ بالستیکی زره (عدم فرض^۴ شرایط شبه استاتیک)
- اعمال شرایط مرزی زره در پاسخ عمومی آن
- قابلیت تعمیم برای اشکال هندسی مختلف سر پرتابه با اصلاح روابط مربوط به کرنش موضعی

این مدل تحلیلی با تقسیم تغییر شکل زره به دو قسمت عمومی (خیز زره در اثر برخورد پرتابه) و موضعی (ناشی از فرورفتن پرتابه در زره) و با این فرض که تنها قسمتی از زره که توسط موج برشی طی شده است در پاسخ عمومی سهیم است با محاسبه نیروی مقاوم در برابر نفوذ پرتابه از روابط کرنش موضعی به تحلیل سینماتیک فرآیند نفوذ پرتابه در زره بر اساس اصل بقای اندازه حرکت پرداخته است.

در این مدل ضریب تصحیحی تحت عنوان K در نظر گرفته شده است که وابسته به نوع و جنس زره می‌باشد و با بدست آوردن مقدار آن برای یک جنس معین از زره می‌توان سرعت حد بالستیک زره‌هایی از آن جنس با ضخامتها و تعداد لایه‌های متفاوت را محاسبه نمود. فرضهای اولیه این مدل عبارتند از:

- ۱- پرتابه صلب است.
- ۲- شکل هندسی نوک پرتابه مخروطی می‌باشد.
- ۳- رفتار الیاف و رزین، الاستیک خطی فرض شده است.
- ۴- رفتار زره کامپوزیتی ایزوتروپ است.
- ۵- تغییر شکل عمومی زره کامپوزیتی از روابط تئوری صفحه نازک تبعیت میکند.
- ۶- از ایجاد برآمدگی در سطح پشتی زره صرفنظر شده است.
- ۷- شرایط مرزی زره تا وقتی که موج برشی به مرز زره نرسیده است تاثیری در پاسخ بالستیکی آن ندارد و همیشه موج در یک سطح دایره‌ای در سطح زره منتشر میشود.
- ۸- شرایط مرزی زره، گیردار و به شکل دایره در نظر گرفته شده است و در غیر اینصورت بایستی پس از رسیدن موج برشی به مرز زره روابط نیرو-تغییر مکان تغییر شکل عمومی برای شرایط مرزی زره مورد نظر اصلاح شود.
- ۹- کرنش ناشی از تغییر شکل عمومی زره در مقابل کرنش موضعی آن ناچیز و قابل صرفنظر میباشد.
- ۱۰- الیاف بر روی سطح مخروطی پرتابه لغزشی ندارند.
- ۱۱- گسیختگی موضعی زره در پاسخ عمومی آن تاثیری ندارد.



شکل (۱) انتشار موج ضربه در زره پلیمری نرم.

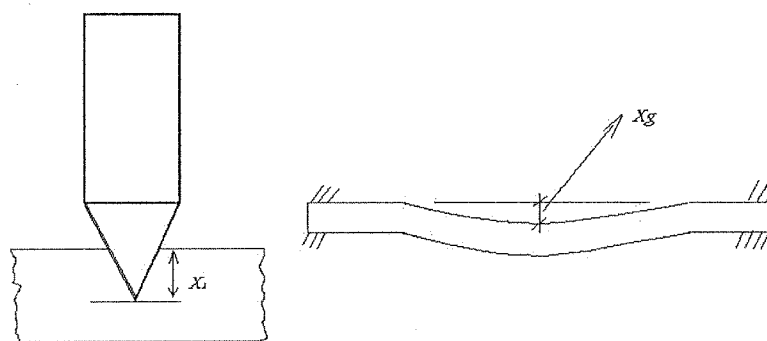
تاثیر رزین در پاسخ بالستیکی زره‌های پلیمری

الیاف قبل از آغشته شدن به رزین تنها قادر به تحمل کشش در راستای خود می‌باشند و پس از اصابت گلوله مانند شکل (۱) در یک سطح مخروطی شکل میگیرند که شعاع این ناحیه مخروطی قبل از رسیدن موج به مرز نمونه برابر است با شعاع انتشار موج کششی که از رابطه زیر قابل محاسبه است. [۱۰ و ۱۱]

$$r = (E/\rho)^{1/2} \cdot t \quad (۱)$$

در رابطه فوق، ρ دانسیته الیاف و E مدول الاستیک آن می‌باشد و t مدت زمانی است که از لحظه برخورد طی شده است. آغشته کردن لایه‌های بافته شده از الیاف به رزین باعث ایجاد استحکام برشی و خمشی در آن می‌شود به گونه‌ای که می‌توان رفتار عمومی آن را مانند رفتار یک صفحه نازک در نظر گرفت. از طرفی بدلیل پیوستگی که رزین بین الیاف ایجاد میکند، در این مدل اینگونه فرض شده است که با نفوذ تدریجی پرتابه در زره این الیاف بدون جابجائی جانبی بصورت عمودی حرکت کرده و روی سطح پرتابه شکل می‌گیرند. به عبارتی از لغزیدن الیاف روی سطح نوک پرتابه صرفنظر شده است. با توجه به مطالب مذکور می‌توان نتیجه گرفت که در مورد پانلهای کامپوزیتی FRP بایستی علاوه بر تغییر شکل عمومی، یک تغییر شکل موضعی نیز در نظر گرفته شود.

در مجموع آغشته کردن لایه‌های پلیمری به رزین باعث کاهش جابجائی زره در طی فرآیند نفوذ و افزایش حداکثر نیروی نفوذ می‌شود.



شکل (۲) تغییر شکل موضعی و عمومی زره کامپوزیتی.

تحلیل پاسخ بالستیکی زره و روابط اساسی

با توجه به مطالب فوق در این مدل اینگونه فرض می‌شود که پس از برخورد پرتابه به هدف دو تغییر شکل. یکی موضعی^۵ و دیگری عمومی^۶ آن ایجاد می‌شود. تغییر شکل موضعی همان تغییر شکل الیاف در تماس با پرتابه روی سطح آن و تغییر شکل عمومی، ایجاد تغییر شکل الاستیک در پانل کامپوزیتی در اثر نیروی ناشی از برخورد پرتابه میباشد. لذا برای تغییر مکان پرتابه (X) مطابق شکل (۲) داریم: [۹]

$$X = X_L + X_g \quad (۲)$$

X_L عمق نفوذ پرتابه و X_g خیز نقطه میانی زره می‌باشد.

برای تعیین سرعت لحظه‌ای پرتابه در حین نفوذ از اصل بقای اندازه حرکت استفاده شده است که نیروی مقاوم در برابر نفوذ پرتابه، با صرفنظر کردن از نیروی اصطکاک بین پرتابه و زره، همان نیروی ناشی از کرنش موضعی ایجاد شده در الیاف کامپوزیت در محل نفوذ پرتابه (F_L) میباشد. این نیرو باعث ایجاد تغییر شکل و خیز در نقطه وسط پانل نیز می‌شود. پس داریم:

$$F = F_L = F_g \quad (۳)$$

$$F = m_p \cdot a \quad (۴)$$

که F_g نیروی وارد بر زره در محل برخورد پرتابه، a شتاب پرتابه و m_p جرم آن می‌باشد.

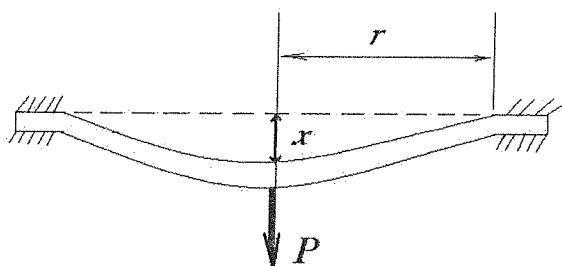
اکنون با این فرض که در فاصله‌های زمانی کوچک، نیروی وارد بر پرتابه ثابت بوده و برابر مقدار آن در انتهای فاصله زمانی است با استفاده از روابط سینماتیک شتاب ثابت، سرعت (V) و موقعیت لحظه به لحظه پرتابه قابل محاسبه است.

$$V_2 = V_1 + a_2 \cdot t \quad (5)$$

$$X_2 = X_1 + V_1 \cdot t + 1/2 a_2 \cdot t^2 \quad (6)$$

تغییر شکل عمومی زره^۷

برای محاسبه نیروی ناشی از تغییر شکل عمومی زره کامپوزیتی (FG) از روابط نیرو-تغییر مکان (خیز نقطه میانی) صفحه نازک به شکل دایره با شرایط مرزی گیردار با فرض ایزوتروپ بودن آن استفاده شده است. فرض ایزوتروپ بودن پانل در صورتی که نحوه چیدمانی لایه‌های پارچه‌ای آن بصورت اتفاقی (Random Lay up) و یا شبه ایزوتروپ (0/+45/90/-45) باشد، از دقت کافی برخوردار خواهد بود.



شکل (۳) خیز صفحه نازک با شرایط مرزی گیردار و بار متمرکز در وسط.

برای رابطه خیز صفحه نازک به شعاع r با نیروی وارد بر مرکز آن P با فرض شرایط مرزی گیردار داریم: (شکل-۳)

$$P = 16\pi D x / r^2 \quad (7)$$

که در رابطه بالا x خیز نقطه مرکزی صفحه و D سختی خمشی آن است که از رابطه زیر محاسبه میشود.

$$D = E \cdot t_{sh}^3 / 12(1-\nu^2) \quad (8)$$

در این رابطه ν ضریب پواسان جنس ورق، t_{sh} ضخامت ورق و E مدول الاستیک آن میباشد.



شکل (۴) گسترش موج برشی در زره کامپوزیتی و تغییر شکل عمومی آن.

در این مدل مطابق شکل (۴) فرض شده است که در هر لحظه شعاع این ناحیه دایره‌ای برابر با شعاعی است که موج برشی در هدف از نقطه برخورد طی نموده است (R_g) و از رابطه زیر محاسبه میشود. [۸]

$$R_g = c \cdot t = (G/p)^{1/2} \cdot t \quad (9)$$

G مدول برشی زره، ρ چگالی زره، c سرعت انتشار موج برشی و t زمان طی شده از لحظه برخورد میباشد. بنابراین در این مدل در هر لحظه تنها شعاعی از زره که توسط موج برشی طی شده است، در پاسخ بالستیکی و مقاومت آن در برابر نفوذ دخیل می باشد. یعنی هرچه زمان نفوذ کمتر (انرژی برخورد بیشتر) باشد، شعاع این ناحیه کمتر شده و صلبیت زره در برابر پرتابه بیشتر خواهد بود (ظرفیت جذب انرژی کاهش می یابد) و از طرفی قبل از رسیدن موج برشی به مرز زره شرایط مرزی و هندسه آن تاثیری در پاسخ بالستیکی ندارد. اگر Rg بزرگتر از شعاع زره (L) محاسبه شود باید شعاع ناحیه دایره ای همان شعاع نمونه در نظر گرفته شود (البته به شرطی که مرز زره به شکل دایره باشد)، چون موج از مرز نمونه فراتر نمی رود. حال با توجه به رابطه (۷) برای نیروی ناشی تغییر شکل عمومی زره (Fg) داریم:

$$Fg = (16\pi D/Rg^2) \cdot Xg \quad (10)$$

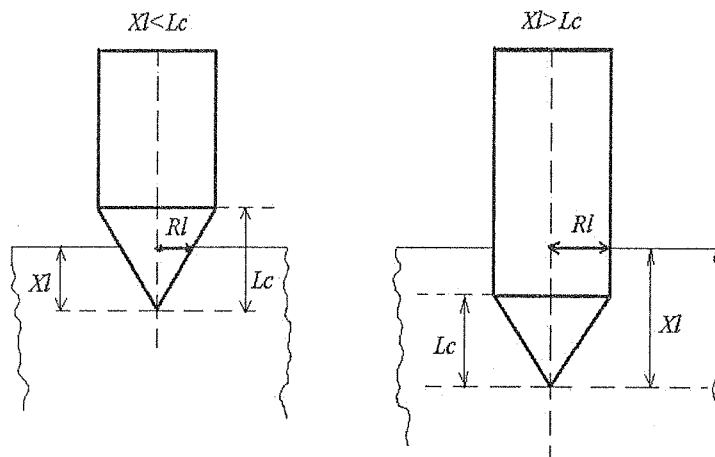
قابل ذکر است که برای تعیین پاسخ عمومی زره از تاثیر گسیختگی موضعی زره در رفتار عمومی آن صرف نظر شده است.

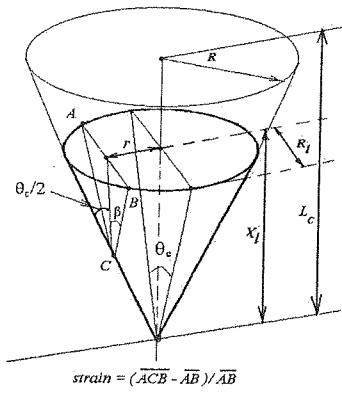
تغییر شکل موضعی زره

همانگونه که گفته شد F_L یا نیروی مقاوم موضعی با محاسبه نیروی ناشی از کرنش موضعی ایجاد شده در الیاف هدف در محل نفوذ پرتابه بدست می آید. لذا در ابتدا لازم است که روابطی برای تعیین کرنش موضعی ایجاد شده در زره ارائه شود. لذا داریم:

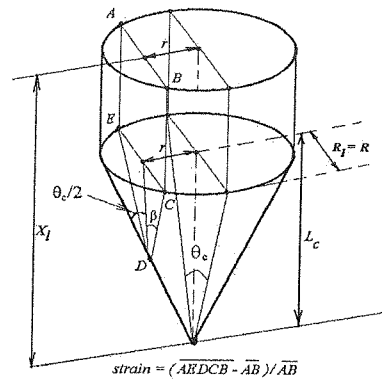
$$F_L = f(X_L) \quad (11)$$

اگر فرض شود در هنگام نفوذ پرتابه به زره، الیاف در تماس با پرتابه بصورتی که قبلاً توضیح داده شد روی سطح آن بنشینند، مطابق شکل (۵) می توان روابط کرنش را برای الیافی که در فاصله r از محور پرتابه واقع شده اند بصورت زیر نوشت:



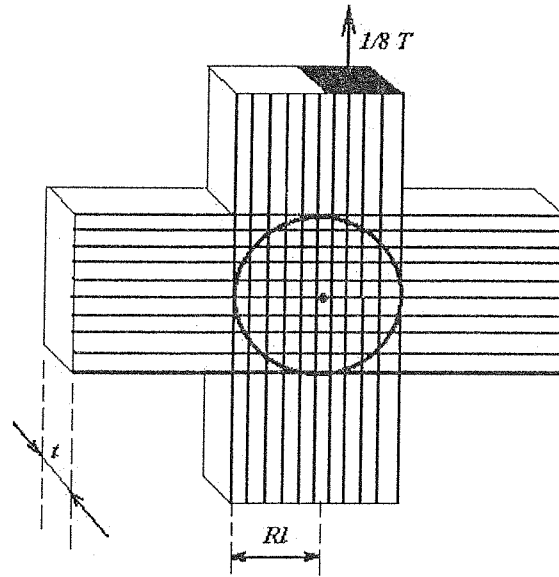


(الف)



(ب)

شکل (۵) تغییر شکل الیاف الف - قبل از نفوذ کامل نوک پرتابه، ب - بعد از نفوذ کامل نوک پرتابه در زره.



شکل (۶) سطح موثر مقاوم در برابر نفوذ پرتابه.

اگر $(X_L < L_c)$

$$\epsilon_r = 1/\sin\beta_r - 1 \quad (12)$$

و اگر $(X_L > L_c)$

$$\epsilon_r = 1/\sin\beta_r + (X_L - L_c)/(R^2 - r^2)^{0.5} - 1 \quad (13)$$

که در روابط فوق L_c طول نوک مخروطی پرتابه می‌باشد. بجز الیاف در تماس با راس نوک مخروطی پرتابه، شکل تغییر یافته آن قسمت از الیاف که روی سطح مخروطی پرتابه شکل گرفته‌اند در عمل بصورت یک هذلولی می‌باشد. ولی در مدل حاضر همانگونه که در شکل (۵) نیز مشاهده می‌شود این هذلولی با مثلث متساوی‌الساقینی که در آن محاط است و نصف زاویه راس آن β می‌باشد، تقریب زده شده است. قابل توجه است که کرنش از الیاف در تماس با نوک پرتابه تا الیافی که در تماس با انتهای ناحیه مخروطی می‌باشند

تدریجاً کاهش می‌یابد با این فرض که مطابق شکل (۵) زاویه شکل گیری آنها (β)، مطابق روابط هندسی بدست آمده از ($\theta_c/2$) تا ($\pi/2$) افزایش می‌یابد.

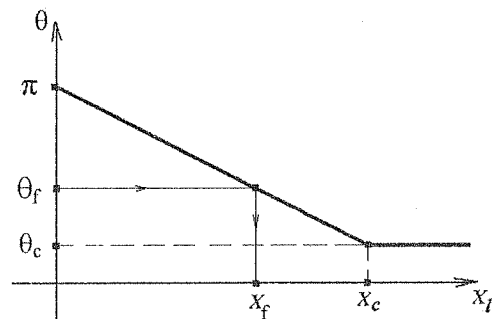
$$\tan \beta_r = [(R_L+r)/(R_L-r)]^{1/2} \cdot \tan(\theta_c/2) \quad (14)$$

حال با داشتن روابط کرنش با توجه به رابطه (۱۴) می‌توان از رابطه (۱۵) نیروی مقاوم موضعی (F_L) را با تصویر کردن نیروی کشش ایجاد شده در سطح موثر ناحیه تغییر شکل یافته (در جهت الیاف تار و پود) در راستای قائم بدست آورد. مطابق شکل (۶) سطح موثر مقاوم در برابر نفوذ، هشت برابر سطح هاشور خورده می‌باشد. σ_r تنش ایجاد شده در شعاع r از محور پرتابه ناشی از کرنش موضعی می‌باشد.

$$\sigma_r = E \cdot \varepsilon_r \quad (15)$$

$$F_L = 8 \int \sigma_r \cdot \cos \beta_r \cdot t_{sh} \cdot dr \quad (16)$$

در رابطه فوق محدوده انتگرالگیری ($0-R_L$) و ضخامت لایه مورد نظر می‌باشد.



شکل (۷) تغییر زاویه سطح مخروطی با افزایش عمق نفوذ.

X_f جابجائی پرتابه برای شروع گسیختگی الیاف اولیه و X_c جابجائی پرتابه برای آنکه سطح مخروطی فرضی بر نوک مخروطی پرتابه منطبق شود

فرض مهم

در این مدل فرض شده است که وقتی نوک پرتابه با سطحی از ضخامت هدف تماس می‌یابد، تا وقتی که مقدار معینی از طول ناحیه مخروطی نوک پرتابه در آن فرو نرفته است، الیاف آن سطح بطور کامل روی سطح مخروطی نوک آن نمی‌نشینند و قبل از آن روی سطوح مخروطی فرضی با زاویه راس بیشتر قرار دارد. حال اینگونه فرض می‌کنیم که اگر یک پرتابه با نوک مخروطی به زره کامپوزیتی برخورد کند در حین نفوذ نوک آن در زره، زاویه راس سطح مخروطی فرضی که الیاف روی آن شکل می‌گیرند به صورت خطی با افزایش عمق نفوذ پرتابه در هدف از مقدار اولیه خود (π) کاهش می‌یابد. لذا برای رابطه زاویه سطح مخروطی θ با عمق نفوذ X_L مطابق شکل (۷) داریم:

$$\theta - \theta_i = (X_L - X_{L_i}) \cdot (\theta_i - \pi) / X_{L_i} ; (\theta > \theta_c) \quad (17)$$

اکنون اگر شیب کاهش زاویه راس سطح مخروطی فرضی را برای یک زره معین برابر مقدار ثابت K فرض شود، خواهیم داشت:

$$\theta = K \cdot X_L + \pi ; (\theta > \theta_c) \quad (18)$$

گسیختگی الیاف با افزایش عمق نفوذ

در این مدل معیار گسیختگی، ایجاد کرنش گسیختگی (ϵ_f) در زره می‌باشد که خاصیتی است وابسته به جنس زره و محدوده نرخ کرنش. مطابق این فرض، تا زمانی الیاف در برابر نفوذ پرتابه مقاومت می‌کنند که کرنش موضعی ایجاد شده در آنها از کرنش گسیختگی تجاوز ننماید.

از آنجاکه زره مورد بررسی بصورت کامپوزیتی از الیاف پلیمری و رزین می‌باشد و از طرفی معمولاً کرنش گسیختگی رزین کمتر از الیاف پلیمری است، ابتدا رزین گسیخته شده و پس از آن الیاف دچار گسیختگی می‌شوند. در مدل حاضر برای محاسبه کرنش ایجاد شده در جنس زره از کرنش عمومی در مقابل کرنش موضعی صرف‌نظر شده است. با توجه به روابط ارائه شده برای کرنش موضعی می‌توان نتیجه گرفت که قبل از نفوذ کامل نوک مخروطی پرتابه در زره بیشترین کرنش مربوط به الیاف در تماس با راس نوک مخروطی پرتابه (الیاف اولیه) می‌باشد (شکل ۵-الف)، لذا با توجه به فرض مهمی که در بخش قبل شرح داده شد برای (θ_f) زاویه راس سطح مخروطی فرضی که باعث گسیختگی این الیاف میشود، داریم:

$$\epsilon_f = 1/\sin(\theta_f/2) - 1 \quad (19)$$

$$\theta_f = 2 \text{ Arcsin}(1/\epsilon_f) \quad (20)$$

پس از محاسبه θ_f یکی از سه حالت زیر پیش می‌آید:

$$\text{الف - } X_f > L_c \text{ یا } \theta_f < \theta_c$$

که چون در این حالت امکان شکل‌گیری الیاف اولیه روی سطح مخروطی با زاویه کمتر از زاویه نوک مخروطی پرتابه وجود ندارد و از طرفی تا زمانی که نوک پرتابه بطور کامل وارد زره نشده است کرنش ثابت باقی می‌ماند لذا همانگونه که در شکل (۸-الف) نشان داده شده است، گسیختگی پس از نفوذ قسمتی از بخش استوانه‌ای پرتابه در هدف، صورت می‌گیرد. L_f عمق گسیخته شده از ضخامت زره می‌باشد. در این حالت برای محاسبه X_f باید از رابطه (۱۲) استفاده نمود.

$$\text{ب - } X_f = k \cdot L_c \text{ یا } \theta_f = \theta_c$$

که در این حالت زاویه ای که باعث گسیختگی الیاف اولیه میشود برابر است با زاویه نوک پرتابه. نحوه گسیختگی الیاف در این حالت در شکل (۸-ب) نشان داده شده است.

$$\text{ج - } X_f < k \cdot L_c \text{ یا } \theta_f > \theta_c$$

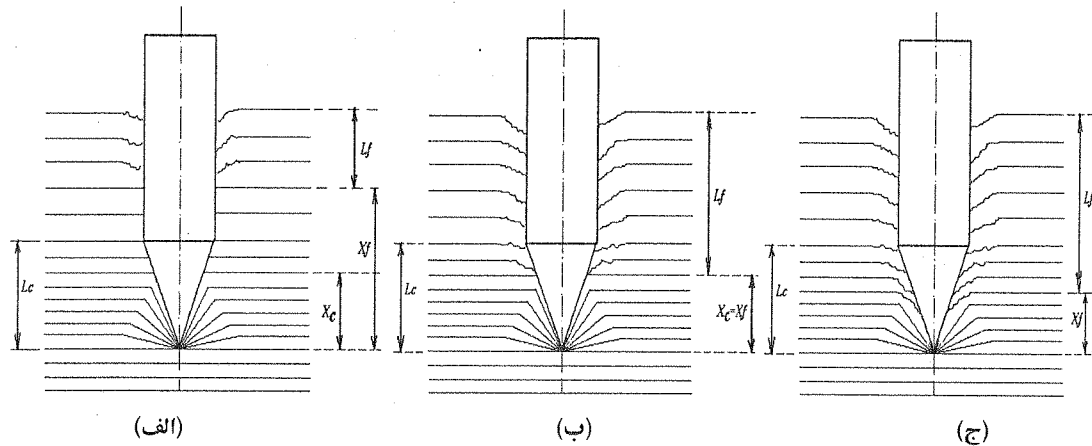
در این حالت الیاف قبل از آنکه روی سطح پرتابه بنشینند در سطحی مخروطی با زاویه بیشتر از زاویه نوک پرتابه گسیخته میشوند. نحوه گسیختگی الیاف اولیه در این حالت در شکل (۸-ج) نشان داده شده است.

از آنجا که در محدوده شرایطی که نتایج مدل با نتایج تجربی موجود مقایسه شده است اغلب حالت (ج) رخ میدهد. با این فرض و با فرض اینکه ضخامت زره بیش از طول نوک مخروطی پرتابه است میتوان مراحل گسیختگی الیاف یک لایه از زره را بر اساس مدل این مقاله بصورت زیر تشریح نمود.

(قابل توجه است که منظور از یک لایه از زره در این مدل، قسمتی از ضخامت آن است که در یک فاصله زمانی اختیار شده برای حل معادلات، مورد نفوذ پرتابه واقع میشود)

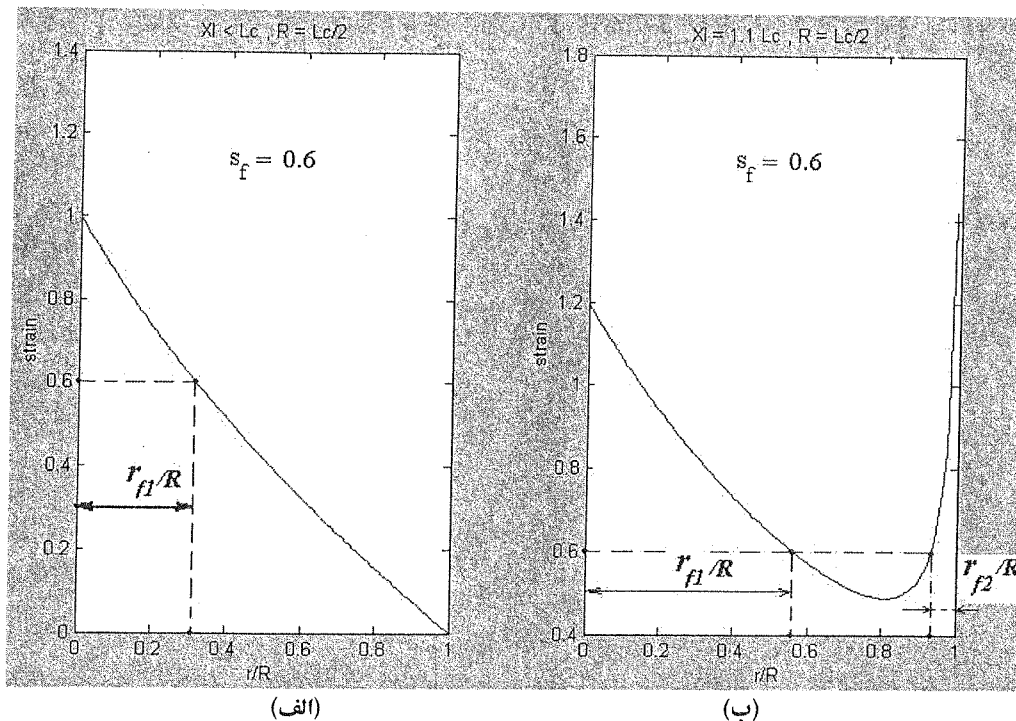
۱- برخورد پرتابه به زره و نفوذ نوک مخروطی آن در زره به اندازه ای که الیاف اولیه در تماس با راس نوک مخروطی به کرنش گسیختگی برسند و گسیخته شوند.

- ۲- نفوذ پرتابه در زره تا حدی که سطح مخروطی فرضی ایجاد شده در سطح آن منطبق بر سطح مخروطی نوک پرتابه شود که تا این مرحله شعاع ناحیه گسیخته شده به شعاع r_{F1} از محور پرتابه گسترش می یابد. (شکل ۹-الف)
- ۳- از شروع مرحله ۲ تا زمانی که تمامی نوک پرتابه در زره فرو می رود، نسبت شعاع ناحیه گسیخته شده (r_{F1}) به شعاع ناحیه مخروطی ایجاد شده در زره (R_L) مقداری ثابت بوده و به دلیل افزایش R_L در این فاصله، شعاع ناحیه گسیخته شده نیز افزایش می یابد. (شکل ۹-الف)
- ۴- نفوذ قسمت استوانه ای پرتابه در زره و شروع گسیختگی الیاف از شعاع ($r=R_L$) در حین افزایش شعاع ناحیه گسیخته شده از محور پرتابه و افزایش ناحیه گسیخته شده با نفوذ هرچه بیشتر پرتابه در زره تا زمانیکه الیاف اولین لایه بطور کامل گسیخته شوند. مطابق (شکل ۹-ب) که مربوط به زمانی است که پرتابه در زره به اندازه $1/1$ برابر طول نوک مخروطی آن نفوذ نموده باشد، مشاهده میشود که شعاع ناحیه گسیخته شده از محور پرتابه (r_{F1}) میباشد و از طرفی یک ناحیه گسیخته شده به طول شعاعی (r_{F2}) از قسمت محیطی پرتابه ($r/R_L=1$) ایجاد شده است. قابل توجه است که پس از نفوذ کامل نوک پرتابه در زره، مقدار R_L ثابت می ماند.
- ۵- از این پس لایه ها یکی پس از دیگری بطور کامل گسیخته می شوند و نیروی مقاوم در برابر نفوذ پرتابه تقریباً ثابت می ماند.
- ۶- رسیدن نوک پرتابه به صفحه پشتی زره و کاهش نیروی مقاوم در برابر حرکت پرتابه تا زمانیکه آخرین لایه نیز گسیخته شود و نهایتاً خروج پرتابه از زره.



شکل (۸) حالت‌های مختلف گسیختگی الیاف اولیه L_r ضخامتی از زره که الیاف اولیه گسیخته شده‌اند.

$$\text{الف - } \theta_r < \theta_c, \text{ ب - } \theta_r = \theta_c, \text{ و ج - } \theta_r > \theta_c$$



شکل (۹) تغییر کرنش در الیاف یک لایه بر حسب r/R_1

r فاصله از محور پرتابه و R_1 شعاع سطح مخروطی ایجاد شده
 S_f کرنش گسیختگی، زاویه نوک پرتابه ۶۰ درجه
 شعاع پرتابه نصف طول نوک مخروطی آن

محاسبه مدول الاستیک زره کامپوزیتی

برای محاسبه مدول الاستیک زره کامپوزیتی (E) مطابق روابط ارائه شده برای کامپوزیتها میتوان نوشت: [۱۲]

$$E_u = E_f \cdot v_f + E_m \cdot v_m \quad (21)$$

$$v_m = 1 - v_f \quad (22)$$

در رابطه اخیر v_f , v_m بترتیب درصد حجمی الیاف و رزین در کامپوزیت و E_f , E_m بترتیب مدول الاستیک الیاف و رزین و E_u مدول الاستیک کامپوزیت با الیاف یک جهته (uni directional) در جهت کشش الیاف می باشد. حال اگر الیاف بصورت مربعی بافته شده باشند از آنجا که بصورت یکنواخت در دو جهت توزیع یافته اند بایستی مقدار درصد حجمی الیاف را در هر جهت نصف مقدار واقعی آن در نظر گرفت. لذا با فرض بافت مربعی الیاف در کامپوزیت FRP برای مدول الاستیک آن در جهت کشش الیاف داریم:

$$v_{fa} = 0.5 v_f \quad (23)$$

$$E_{0/90} = E_f \cdot v_{fa} + E_m \cdot (1 - v_{fa}) \quad (24)$$

حال برای مدول الاستیک در حالت (Quasi Isotropic) یعنی چیدمانی لایه ها بصورت (0/+45/90/-45) داریم:

$$E_{Q1} = 0.5 E_{0/90} + 0.5 E_{45} \quad (25)$$

که روابط مربوط به محاسبه E_{45} در مدل تجربی گلد اسمیت [۱۲] ارائه شده است. چونکه در هر سطحی از ضخامت زره یک بافت مربعی وجود دارد و سطح موثر برای ایجاد نیروی مقاوم موضعی مطابق شکل (۶) در دو جهت تار و پود می‌باشد، لذا برای محاسبه نیروی ناشی از کرنش موضعی باید از مقدار $E_{0/90}$ استفاده نمود. البته مقدار بدست آمده برای مدول الاستیک E برای محاسبه نیروی ناشی از کرنش موضعی تا زمانی اعتبار دارد که کرنش موضعی ایجاد شده از کرنش گسیختگی رزین بیشتر نباشد و در غیر این صورت در نظر گرفتن E_f به تنهایی کفایت می‌کند که در این حالت باید فقط سطح مقطع الیاف برای محاسبه نیروی ناشی از کرنش موضعی منظور شود. از طرفی برای تعیین پاسخ عمومی زره از رابطه (۱۰)، بایستی از مقدار E_{Q1} استفاده نمود، بعلاوه اینکه در این حالت تمامی ضخامت زره و در همه جهتها دخالت دارد.

حل معادلات

برای حل معادلات این مدل فاصله زمانی معین (dt) اختیار شده است و با داشتن سرعت و موقعیت اولیه پرتابه، سرعت و موقعیت آن پس از این فاصله زمانی با شتاب ثابت از روابط سینماتیک زیر محاسبه میشود. قابل توجه است که شتاب پرتابه در هر فاصله زمانی از نیروی وارده به آن در انتهای فاصله زمانی بدست می‌آید. [۱۹]

$$V_{i+1} = V_i + a_{i+1}.dt \quad (26)$$

$$X_{i+1} = 1/2 a_{i+1} . dt + V_i.dt + X_i \quad (27)$$

$$X_{i+1} = X_{L i+1} + X_{g i+1} \quad (28)$$

$$a_{i+1} = F_{i+1}/m_p \quad (29)$$

$$F_{g i+1} = (16\pi D/Rg_{i+1}^2).X_{g i+1} \quad (30)$$

$$F_{L i+1} = f(X_{L i+1}) \quad (31)$$

برای حل معادلات فوق یک کد کامپیوتری در محیط MATLAB تهیه شده است و بحث پیرامون نتایج مدل و مقایسه آن با نتایج تئوری و تجربی موجود، در بخش بعد ارائه شده است.

نتایج و بحث

در این بخش برای تعیین دقت و صحت نتایج مدل جدید ارائه شده، نتایج آن با یافته‌های دیگر مدل‌های تحلیلی و نتایج تجربی موجود در مرجع [۱۲] مقایسه شده است. این نتایج تجربی مربوط به تعیین مقاومت بالستیک پانلهای FRP با الیاف از جنس کولار ۲۹ در مقابل نفوذ پرتابه با نوک مخروطی می‌باشد.

طبق ادعای مدل این تحقیق اگر فرض شود که برای زرهی خاص مقدار K ثابت باشد، با بدست آوردن آن از یک نقطه تجربی (حدبالستیک برای ضخامت معینی از آن زره) میتوان حد بالستیک ضخامت‌های دیگر از آن زره و یا با تعداد لایه‌های متفاوت را پیش‌بینی نمود. از طرفی برای سرعت معین برخورد پرتابه میتوان شتاب، سرعت و جابجائی لحظه به لحظه پرتابه را

در حین فرآیند نفوذ و سرعت باقیمانده آن را محاسبه نمود. برای حل مدل در ابتدا بایستی شرایط اولیه و فیزیکی مساله تعیین شود.

علت استفاده از نتایج تجربی مرجع [۱۲] آن است که در این مرجع درصد اجزا، تشکیل دهنده زره کامپوزیتی، خواص آنها و ابعاد و شرایط مرزی زره بصورت دقیق مشخص شده است. در جدول (۱) مشخصات فیزیکی و مکانیکی زره کامپوزیتی مورد آزمایش ارائه شده است. نمونه آزمایش به شکل دایره با شعاع ۷۰ (mm) و با شرایط مرزی گیردار می باشد.

جدول (۱) مشخصات زره مورد آزمایش [۱۲].

جنس الیاف زره	درصد حجمی رزین	چگالی زره Kg/m^3	مدول الاستیک زره GPa	مدول الاستیک زره GPa	مدول برشی زره GPa	کرنش گسیختگی الیاف %	کرنش گسیختگی رزین %
کولار ۲۹	۴۵	۱۳۷۷	۷۴	۱/۸	۰/۷۷	۲	۲

با توجه به مقادیر مدول الاستیک الیاف و رزین، برای مدول الاستیک $E_{0/90}$ و E_{Q1} داریم:

$$E_{0/90} = 0.275(74) + 0.725(1.8) = 20 \text{ (GPa)}$$

$$E_{Q1} = 0.5 E_{0/90} + 0.5 E_{45} = 11.4 \text{ (GPa)}$$

که مقدار E_{45} در رابطه اخیر با توجه نتایج مرجع [۱۲] برابر ۲/۸ (GPa) در نظر گرفته شده است.

برای تعیین حدبالستیک از دو نمونه پرتابه با نوک مخروطی ۶۰ درجه و به قطرهای ۹/۲۵ و ۱۲/۷ میلیمتر و با جرمهای به ترتیب ۱۲/۵ و ۲۸/۵ گرم استفاده شده است. با توجه به اطلاعات فوق مدل این تحقیق با فاصله زمانی ۵ میکروتانیه حل شده که نتایج آن در ادامه ارائه شده است.

جدول (۲) مقایسه نتایج تجربی [۱۲] و تحلیلی [۹] با نتایج مدل این تحقیق برای پرتابه ۲۸/۵ گرمی.

ضخامت زره mm	V_{bE} m/s	V_{b8} m/s	خطا %	V_{b13} m/s	خطا %	V_b m/s [۹]	خطا %	K rad/m
۶	۱۰۰	۱۲۰	۲۰	۱۴۲	۴۲	۹۹/۱	۰	۲۰۰
۸	۱۲۵	۱۲۵	۰	۱۴۵	۱۶	۱۱۷/۲	۶/۲	۱۷۳
۹/۵	۱۴۰	۱۳۳	۵	۱۵۳	۹/۳	۱۲۹/۴	۷/۶	۱۶۵
۱۱	۱۵۰	۱۴۱	۶	۱۶۲	۸	۱۴۰/۹	۶	۱۶۱
۱۳	۱۷۵	۱۵۲	۱۳	۱۷۵	۰	۱۵۵/۵	۱۱	۱۵۰

تعیین حدبالستیک

نتایج مدل این تحقیق برای تعیین حدبالستیک زره با ضخامتهای مختلف در برابر پرتابه ۲۸/۵ و ۱۲/۵ گرمی بترتیب در جدول (۲) و جدول (۳) ارائه و با نتایج تجربی مقایسه شده و در هر مورد خطای مدل بر مبنای مقادیر تجربی محاسبه شده است. در این جداول بترتیب حدبالستیک بر مبنای K محاسبه شده برای ضخامت ۱۳ میلیمتر، حدبالستیک بر مبنای K محاسبه شده برای ضخامت ۸ میلیمتر، حدبالستیک تجربی (حاصل از آزمایش) و حدبالستیک بر مبنای مدل ون [۹] می باشند.

جدول (۳) مقایسه نتایج تجربی [۱۲] و تحلیلی [۹] با نتایج مدل این تحقیق برای پرتابه ۱۲/۵ گرمی.

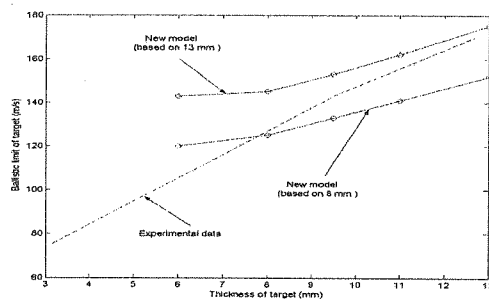
ضخامت زره mm	V_{be} m/s	V_{bs} m/s	خطا %	V_b m/s [۹]	خطا %	K rad/m
۶	۱۲۵	۱۴۷	۱۷/۶	۱۱۱/۳	۱۱	۲۴۴
۸	۱۵۰	۱۵۰	۰	۱۳۱/۳	۱۲/۵	۲۱۷
۹/۵	۱۷۵	۱۵۹	۹/۱	۱۵۴/۲	۱۱/۹	۱۹۸
۱۱	۱۹۰	۱۶۹	۱۱	۱۵۸/۳	۱۶/۷	۱۹۰
۱۳	۲۱۰	۱۸۱	۱۳/۸	۱۷۴/۴	۱۶/۹	۱۸۴

همانگونه که در نتایج جدول (۲) مشاهده میشود ثابت K با ضخامت زره نسبت معکوس دارد. از طرفی درصد خطای مدل برای تعیین حدبالستیک با افزایش اختلاف ضخامت زره با ضخامت مینا (که محاسبات بر مبنای K مربوط به آن ضخامت صورت گرفته است) افزایش می یابد و بجز ضخامتهای کمتر از ضخامت مینا، درصد خطای مدل این تحقیق در مقایسه با خطای مدل ون [۹] کمتر است.

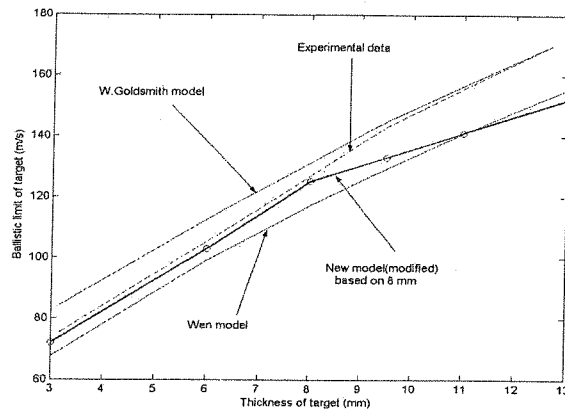
حال هرچه ضخامت مینا کمتر در نظر گرفته شود خطای مدل کمتر خواهد بود، البته با توجه به این نکته که اگر ضخامت زره بیش از اندازه کم شود خیز زره بیش از ضخامت آن شده و بدلیل صادق نبودن فرض رفتار صفحه نازک برای تغییر شکل عمومی زره، نتایج مدل معقول و دقیقی نخواهد بود. همانگونه که مشاهده میشود بیشترین درصد خطا مربوط به ضخامت حداقل (۶ mm) است.

از طرفی باید توجه داشت که مقدار حدبالستیک حاصل از مدل بر مبنای ضخامت بالا (۱۳ میلیمتر) برای ضخامتهای کمتر از ۱۳ میلیمتر بیش از مقدار حقیقی (تجربی) می باشد در حالیکه اگر محاسبات بر مبنای ضخامت کمتر (۸ میلیمتر) باشد حدبالستیک حاصل از مدل، کمتر از مقدار تجربی است. لذا برای اطمینان بیشتر بهتر است از ضخامت مینای کمتر استفاده شود. (شکل ۱۰)

برای افزایش محدوده کارایی مدل برای زره های با ضخامت کم، نتایج مدل برای دو ضخامت ۶ و ۳ میلیمتر با حذف تغییر شکل عمومی زره (حذف خطای حاصل از نقض فرض رفتار صفحه نازک برای تغییر شکل عمومی زره به علت زیاد بودن خیز زره نازک در مقایسه با ضخامت آن) بدست آمده و نتایج حاصل از مدل اصلاح شده در شکل (۱۱) با نتایج تجربی و نتایج دیگر مدل های تحلیلی مقایسه شده است.



شکل (۱۰) مقایسه نتایج مدل این مقاله برای تعیین حدبالستیک بر مبنای ضخامت ۸ میلیمتر با نتایج تجربی [۱۲]

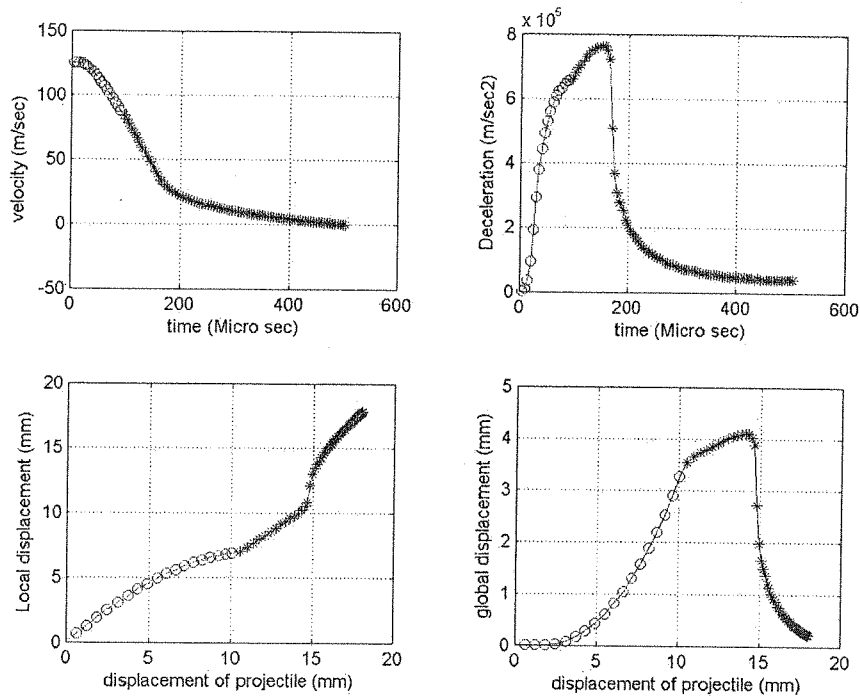


شکل (۱۱) مقایسه نتایج مدل اصلاحی این پایان نامه برای تعیین حدبالستیک بر مبنای ضخامت ۸ میلیمتر با نتایج تجربی [۱۲] و تحلیلی [۹ و ۷].

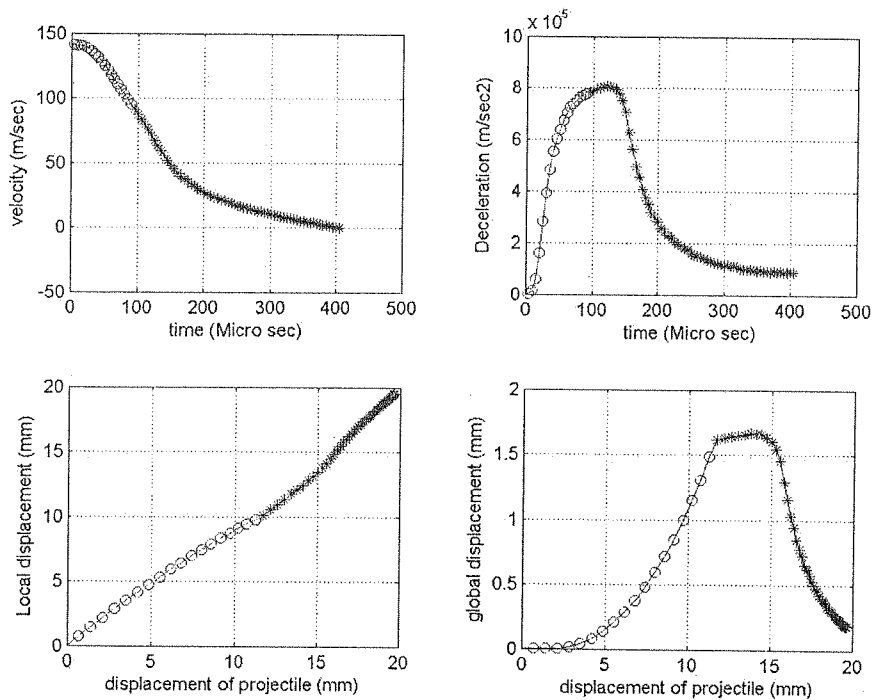
با مقایسه شکلهای (۱۰) و (۱۱) مشاهده می‌شود که با اصلاح انجام گرفته، دقت مدل برای ضخامتهای کمتر از ضخامت مینا افزایش زیادی داشته است. از طرفی در شکل (۱۱) مشهود است که در محدوده ضخامت در نظر گرفته شده نتایج مدل گلد اسمیت [۷] حدبالستیکی بیش از مقدار تجربی ارائه می‌دهد که از دید طراحی از اطمینان برخوردار نیست و از طرفی دقت مدل این تحقیق در مقایسه با مدل ون [۹] تا ضخامت ۱۱ میلیمتر، در مقایسه با مقادیر حاصل از آزمایش بیشتر است. با توجه به مشاهدات فوق می‌توان نتیجه گرفت که مدل این مقاله می‌تواند با نتایج مطمئن و دقت کافی، حدبالستیک پانلهای FRP را تعیین نماید.

لذا توصیه می‌شود که برای استفاده از مدل مذکور و برای اینکه که بیشترین دقت و محدوده کارایی را داشته باشد، موارد زیر رعایت شود:

- ۱- استفاده از ضخامت مینای حتی الامکان کوچک به حدی که خیز زره مینا از ضخامت زره بیشتر نشود.
 - ۲- حذف تغییر شکل عمومی در مدل، برای تعیین حدبالستیک زره با ضخامت کمتر از ضخامت مینا. در شکلهای (۱۲) و (۱۳) نتایج تحلیل سینماتیک فرآیند نفوذ برای ضخامتهای مختلف زره در مقابل پرتابه ۲۸/۵ گرمی در سرعت برخورد برابر حدبالستیک ارائه شده است. قابل توجه است که در این شکلهای قسمتی از نمودار که با علامت O مشخص شده مربوط به زمانی است که موج برشی به مرز زره نرسیده است و قسمتی که با علامت * مشخص شده مربوط به زمانی است که موج به مرز زره رسیده است و شرایط مرزی آن در حل مدل اعمال می‌شود.
- هر کدام از این شکلهای نمودارهای سرعت - زمان، شتاب - زمان، جابجایی موضعی - جابجایی کل و جابجایی عمومی - جابجایی کل را ارائه می‌دهد. در شکلهای (۱۲) و (۱۳) مشاهده می‌شود که قبل از صفر شدن شتاب (نیروی مقاوم ناشی از کشش الیاف)، پرتابه متوقف شده است لذا سرعت برخورد پرتابه کمتر از حدبالستیک زره بوده است. با دقت بیشتر در این نتایج مشاهده می‌شود که جابجایی عمومی در مقایسه با جابجایی موضعی کوچک است و از طرفی همانگونه که انتظار می‌رود برای زره با ضخامت کمتر اختلاف این دو بیشتر بوده و جابجایی عمومی مقدار بیشتری دارد. همچنین رسیدن موج برشی به مرز زره و تاثیر شرایط مرزی، نتایج مربوط به زره با ضخامت کمتر را بیشتر تحت تاثیر قرار داده است.
- پس از برخورد پرتابه به زره با افزایش عمق نفوذ نیروی مقاوم اعمال شده بر پرتابه به دلیل کشش ایجاد شده در الیاف، افزایش می‌یابد تا اینکه الیاف در تماس با نوک پرتابه به کرنش گسیختگی رسیده و با گسیختگی هرچه بیشتر الیاف در حین افزایش عمق نفوذ (جابجایی موضعی)، نیروی مقاوم در برابر حرکت پرتابه کم شده و در نتیجه شتاب نزولی پرتابه و خیز زره (جابجایی عمومی) کاهش می‌یابد. این نکته با سیر صعودی-نزولی نمودارهای شتاب - زمان و جابجایی عمومی - جابجایی کل توجیه می‌شود.



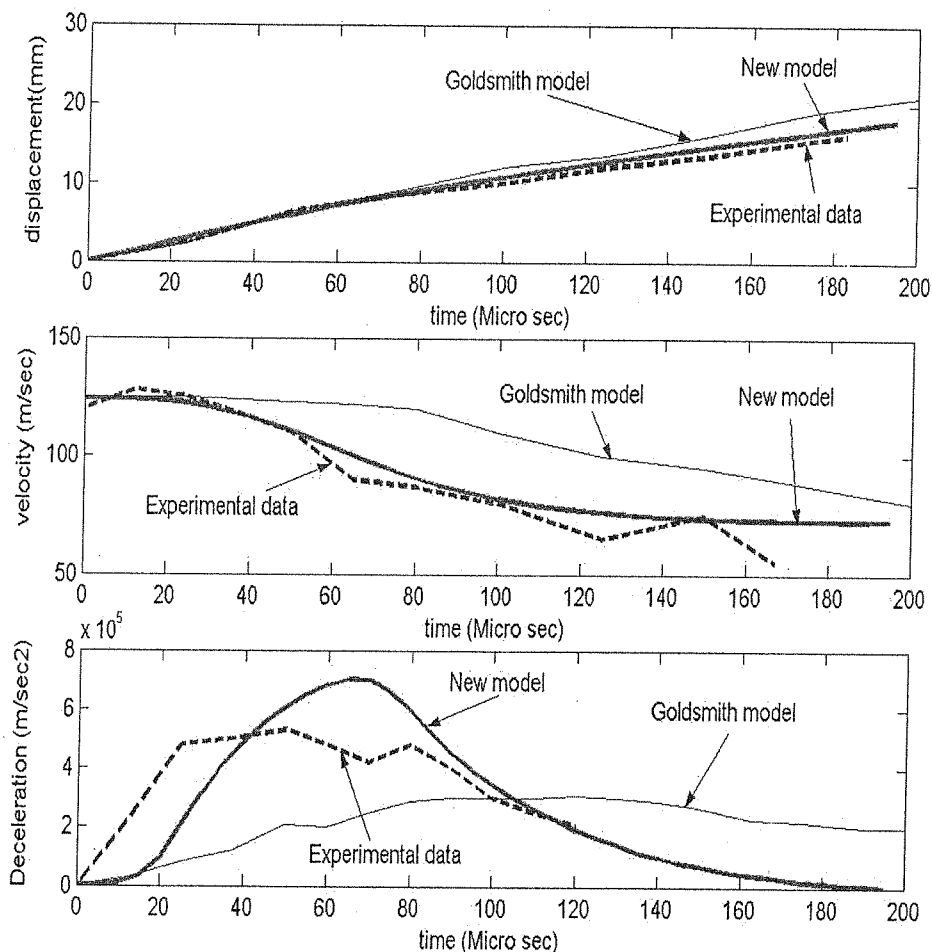
شکل (۱۲) نتایج تحلیل سینماتیک نفوذ پرتابه ۲۸/۵ گرمی در زره به ضخامت ۸ میلیمتر بر مبنای ضخامت ۸ میلیمتر.



شکل (۱۳) نتایج تحلیل سینماتیک نفوذ پرتابه ۲۸/۵ گرمی در زره به ضخامت ۱۱ میلیمتر بر مبنای ضخامت ۸ میلیمتر.

در شکل (۱۴) نتایج تحلیل سینماتیک حاصل از مدل این پایان نامه، برای نفوذ پرتابه ۲۸/۵ گرمی در زره به ضخامت ۶ میلیمتر با نتایج تجربی [۱۹] و تحلیلی [۱۸] مقایسه شده است. با مقایسه این دو شکل می‌توان نتیجه گرفت که:

- حداکثر نیروی نفوذ حاصل از مدل این تحقیق کمی بیش از مقدار تجربی آن بوده و در مقایسه با مدل گلد اسمیت [۷] تطابق بهتری با مقدار تجربی دارد.
 - زمان کامل گسیختگی برابر مقدار حاصل از مدل گلد اسمیت [۷] و کمتر از مقدار تجربی می‌باشد.
 - جابجایی پرتابه در طول زمان نفوذ تا گسیختگی کامل بابر مقدار حاصل از مدل گلد اسمیت [۷] و کمی بیشتر از مقدار تجربی است.
 - سرعت باقیمانده پرتابه حدود مقدار حاصل از مدل گلد اسمیت [۷] و کمی بیش از مقدار تجربی آن است.
- در مجموع تطابق مناسب و قابل قبولی بین نتایج مدل و نتایج حاصل از آزمایش برای تحلیل سینماتیک فرآیند نفوذ مشاهده می‌شود.

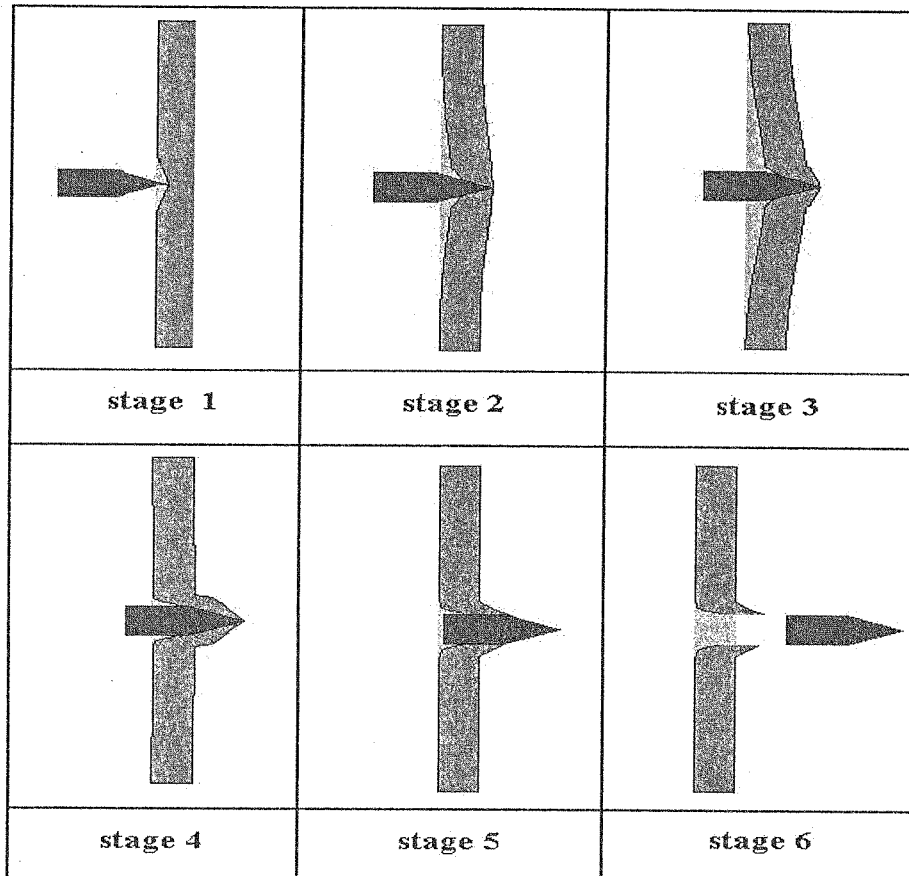


شکل (۱۴) نتایج مدل جدید، برای تحلیل سینماتیک نفوذ پرتابه ۲۸/۵ گرمی با سرعت اولیه ۱۲۵ متر بر ثانیه در زره به ضخامت ۶ میلیمتر بر مبنای ضخامت ۸ میلیمتر و مقایسه با نتایج تجربی [۱۲] و تحلیلی [۷].

شبیه سازی فرآیند نفوذ

برای مشخص شدن نحوه تغییر شکل زره کامپوزیتی در حین فرآیند نفوذ، این قابلیت برای نرم‌افزار تهیه شده در این تحقیق فراهم شده است که پس از تحلیل سینماتیک فرآیند نفوذ، شماتیکی از برخورد پرتابه به زره و نفوذ در آن (بر مبنای روابط تحلیلی مدل) بصورت متحرک قابل مشاهده است.

در شکل (۱۵)، شش نمای متفاوت عکسبرداری شده مربوط به فرآیند نفوذ پرتابه با سرعت اولیه بیش از حد بالستیک زره نشان داده شده است. آنچه از شبیه‌سازی حاصل از نرم‌افزار تهیه شده فهمیده می‌شود عبارت است از: ابعاد نسبی پرتابه و زره، عمق نفوذ پرتابه و خیز زره بصورت لحظه به لحظه، شعاع انتشار موج برشی در زره در هر لحظه و تاثیر یا عدم تاثیر شرایط مرزی زره در پاسخ بالستیک آن، خروج یا عدم خروج پرتابه از زره، نحوه تغییر شکل الیاف سطح جلو و پشت زره و تشکیل سطح مخروطی متناسب با تئوری ارائه شده در مدل. قابل توجه است که تصویر متحرک حاصل از برنامه سرعت حرکت پرتابه و تغییر شکل زره را تعیین نمی‌نماید و تنها موقعیت نسبی لحظه به لحظه را بدون تناسب زمانی نشان می‌دهد.



شکل (۱۵) مراحل مختلف نفوذ پرتابه ۲۸/۵ گرمی با سرعت اولیه ۱۵۰ متر بر ثانیه در زره به ضخامت ۸ میلیمتر.

نتیجه‌گیری

- ۱- مقدار ثابت K برای زره با جنس معین در مقابل پرتابه معین با ضخامت زره نسبت معکوس دارد و از طرفی بهتر است با تغییر شرایط هندسی نوک پرتابه اصلاح شود. دلیل این امر احتمالاً خطای مدل از جهت در نظر نگرفتن برخی مکانیزمهای جذب انرژی از جمله فشردگی رزین و اصطکاک می‌باشد.
- ۲- درصد خطای مدل برای تعیین حدبالستیک با افزایش اختلاف ضخامت زره با ضخامت مینا (که محاسبات بر مبنای K مربوط به آن ضخامت صورت گرفته است) افزایش می‌یابد.
- ۳- اگر ضخامت زره مورد نظر بیش از اندازه کم شود، خیز زره بیش از ضخامت آن شده و بدلیل صادق نبودن فرض رفتار صفحه نازک برای تغییر شکل عمومی زره، نتایج مدل معقول و دقیق نخواهد بود. با بررسی‌های صورت گرفته، اگر در این

شرایط تغییر شکل عمومی زره صفر در نظر گرفته شود، دقت مدل تا حد معقولی افزایش می‌یابد.
 ۴- در نهایت اینکه مدل تحلیلی ارائه شده در این تحقیق با رعایت موارد مذکور، از دید اطمینان و دقت در طراحی زره در مقایسه با مدل‌های تحلیلی معرفی شده، مدلی مناسب برای تحلیل نفوذ گلوله با نوک مخروطی در زره‌های کامپوزیتی تقویت شده با الیاف پلیمری (FRP) می‌باشد.

فهرست علائم

E مدول الاستیک زره	X جابجایی پرتابه
ν ضریب پواسون زره	X_L عمق نفوذ پرتابه در زره (جابجایی موضعی)
R_L شعاع سطح مخروطی ایجاد شده در زره در اثر نفوذ نوک پرتابه	X_g خیز زره (جابجایی عمومی زره)
R شعاع پرتابه	X_f جابجایی پرتابه برای شروع گسیختگی الیاف اولیه
L_c طول نوک مخروطی پرتابه	X_c جابجایی پرتابه برای انطباق سطح مخروطی فرضی ایجاد شده بر نوک مخروطی پرتابه
θ_c زاویه نوک مخروطی پرتابه	F نیروی مقاوم وارد بر پرتابه از جانب زره
θ زاویه راس سطح مخروطی ایجاد شده در زره	F_L نیروی مقاوم وارد بر پرتابه از جانب زره ناشی از نفوذ پرتابه در زره و کشش ایجاد شده در الیاف
$\theta_f = X_f$ زاویه سطح مخروطی در X_f	F_g نیروی مقاوم وارد بر پرتابه از جانب زره ناشی از خیز زره
β_f نصف زاویه راس متساوی‌الساقین شکل گیری الیاف روی یال‌های سطح مخروطی در شعاع r از محور مخروط	m_p جرم پرتابه
ϵ_f کرنش ایجاد شده در الیاف در تماس با یالی از سطح مخروطی که در شعاع r واقع شده است	a شتاب پرتابه
S_f کرنش گسیختگی الیاف	V سرعت پرتابه
V_f درصد حجمی الیاف در کامپوزیت	t زمان طی شده از لحظه برخورد
V_m درصد حجمی رزین در کامپوزیت	C سرعت انتشار موج برشی در زره
E_f مدول الاستیک الیاف	G مدول برشی جنس زره
E_m مدول الاستیک رزین	ρ چگالی زره
E_u مدول الاستیک کامپوزیت با الیاف یک جهته	R_g شعاع انتشار موج برشی در زره
E_{QI} مدول الاستیک کامپوزیت با چیدمانی شبه ایزوتروپیک	D سختی خمشی زره
	f_{sh} ضخامت زره

زیر نویس ها

1-W.Goldsmith et al
 2-S.S.Morye et al
 3-H.M.Wen

4-Global deformation
 5-Local Deformation

مراجع

- [1] غلامحسین لیاقت، سعید هدایت رسا، هادی شانظری، "تحلیل نفوذ گلوله در پانلهای کامپوزیتی کولار آغشته به رزین و ارائه مدل تحلیلی"، چهارمین کنفرانس انجمن هوافضا، دانشگاه امیر کبیر، ۱۳۸۱
- [2] -غلامحسین لیاقت، سعید هدایت رسا، سید عبدالوهاب حسینی، "مدلی ساده برای تحلیل نفوذ گلوله در منسوجات"، دهمین کنفرانس مهندسی مکانیک، خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۸۰.
- [3] لیاقت غلامحسین - کرمی حسین، "تحلیل نفوذ گلوله در اهداف چند لایه‌ای" پنجمین کنفرانس مهندسی مکانیک، تبریز، ۱۳۷۶
- [4] لیاقت غلامحسین - هادی صائبی منفرد، "مدلسازی فرایند نفوذ گلوله در منسوجات" سومین کنفرانس مهندسی مکانیک، ۱۳۷۴
- [5] Liaghat G.H., Analysis of the mechanics of perforation by projectile, J.Engng I.R.Iran4(3,4), 127, 1991
- [6] Liaghat G.H. and A. Malekzadeh, A modification to the mathematical model of perforation by Dikshit and Sundarajan, Int.I.Impact Engng , 22, 543-550(1999)
- [7] Guoqi Zhu, Werner Gold Smith & C.K.H.Dharan, Penetration of laminated kevlar by projectiles-II.Analytical model, Int .J.Solids & structures, 29 (4), 421-436(1992).
- [8] S.S.Morye, P.J.Hine, R.A.Duckett, D.J.carr & I.M.ward, Modelling of the energy absorbtion by polymer

- composites upon ballistic impact, Composite science & Technology, 60(2000)2631-2642.
- [9] H.M.Wen, Penetration and perforation of thick FRP laminates, Composites science and technology, (2001), 61, pp.1163-1172
- [10] B.Parga-Landa & F.Hernandez -O livers, An analytical model to predict impact behaviour of soft armours, Int. J. Impact Engng , 16(3),455-466(1995).
- [11] Isaias Sidney Chocron-Benloulou, J.Rodriguez,And Vicente Sanchez-Galvez,A simple model to Simulate Textile Fabric Ballistic Impact Behavior,Textile Res.J.67(7), 520-528(1997)
- [12] Guoqi Zhu, Werner Gold Smith & C.K.H.Dharan, Penetration of laminated kevlar by projectiles-I. Experimental investigation , Int.J. Solids & structures, 29 (4), 399-420(1992)