

## بررسی اثر ضخامت پوشش سطح بر رفتار محفظه استوانه‌ای تحت موج ضربه‌ای ناشی از انفجار زیر آب

داوود آرزومندی<sup>1</sup>، علی اکبر کریمی<sup>2</sup>، علی گله داری<sup>3</sup>

<sup>1</sup> تهران، بزرگراه شهید بابایی، دانشکده فنی دانشگاه امام حسین (ع)، مرکز تحقیقات بالستیک ضربه و انفجار / [darezomand@yahoo.com](mailto:darezomand@yahoo.com)  
<sup>2</sup> تهران، بزرگراه شهید بابایی، دانشکده فنی دانشگاه امام حسین (ع)، مرکز تحقیقات بالستیک ضربه و انفجار / [aliakbarkarimi@yahoo.com](mailto:aliakbarkarimi@yahoo.com)  
<sup>3</sup> تهران، بزرگراه شهید بابایی، دانشکده فنی دانشگاه امام حسین (ع)، مرکز تحقیقات بالستیک ضربه و انفجار / [ali\\_ila84@yahoo.com](mailto:ali_ila84@yahoo.com)

### چکیده

برای اولین بار میندلین<sup>1</sup> و بلیچ<sup>2</sup> [1] در سال 1953 موفق به محاسبه پاسخ سازه پوسته سیلندر تحت موج پله‌ای اریب<sup>3</sup> بر اساس تقریب موج تخت، شدند. هانگ<sup>4</sup> [2] در سال‌های 1969 و 1986 پاسخ پوسته‌های سیلندری را بر مبنای تقریب موج کروی محاسبه نمود. تقریب موج سیلندری برای حل رفتار خطی و غیر خطی پوسته‌های سیلندری توسط هاگستون<sup>5</sup> و هایوود<sup>6</sup> در سال‌های 1991 مورد استفاده قرار گرفته است [3]. تکنیک دیگر تحت عنوان تقریب مجانب مضاعف<sup>7</sup> بر مبنای روش المان مرزی توسط گیر<sup>8</sup> در سال 1978 جهت محاسبه پاسخ موج ضربه‌ای بر روی سازه‌های مغروق ارایه گردیده است [4]. پاسخ الاستیک سیلندر ساده تحت بار موج ضربه‌ای زیر آب به صورت تجربی توسط راندال<sup>9</sup> در سال 1986 مورد مطالعه قرار گرفت [5]. پاسخ دینامیکی غیرخطی پوسته سیلندر آلومینیومی تحت انفجار زیر آب توسط فاکس<sup>10</sup> و وان<sup>11</sup> در سال 1993 و نلسون<sup>12</sup> و همکارانش در سال 1993 [6 و 7]، به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است. برگرسون<sup>13</sup> و همکارانش در سال 1993 [8]، پاسخ دینامیکی یک سیلندر ساده را که توسط لایه‌ای از لعاب پوشش داده شده بود، ارایه نمود که نتایج حاکی از افزایش تخریب سازه بود.

در این مقاله پاسخ محفظه استوانه‌ای مرکب (دارای پوششی از جنس لاستیک) مغروق در آب، تحت بار انفجار زیر آب، با روش اجزاء محدود و به کمک نرم‌افزار ABAQUS 6-7 مورد آنالیز عددی قرار گرفته و نهایتاً تفاوت پاسخ محفظه استوانه‌ای پوشش‌دار و بدون پوشش مورد بررسی قرار می‌گیرد. جهت بررسی اثر ضخامت پوشش بر پاسخ محفظه استوانه‌ای تحت شرایط موج ضربه‌ای پارامترهای جابجایی، کرنش و انرژی داخلی محفظه استوانه‌ای دارای پوشش و بدون پوشش مقایسه شده است. که در نتیجه آن معلوم می‌شود، وقتی محفظه استوانه‌ای تحت شرایط هندسی و مواد پوششی با خواص معلوم، در معرض برخورد با موج ضربه‌ای ناشی از انفجار زیر آب قرار می‌گیرد، انحراف قابل ملاحظه‌ای نسبت به حالت بدون پوشش در مقادیر جابجایی و کرنش مشاهده می‌شود. در واقع پوشش موجب بروز مقادیر کرنش پلاستیک موثر و انرژی داخلی بالاتری در بخش‌های فلزی می‌شود. با افزایش ضخامت پوشش مقدار جابجایی و کرنش در پوسته الاستیک کاهش می‌یابد.

### واژه‌های کلیدی

محفظه استوانه‌ای، پوشش لاستیکی، انفجار زیر آب، موج ضربه‌ای

### 3- اصول انتشار امواج ضربه‌ای و اندرکنش آن با سازه

#### 2-1- انفجار زیر آب

انفجار در واقع یک واکنش شیمیایی بسیار سریع است که مواد اولیه انفجار را به یک گاز در دما و فشار بسیار بالا تبدیل می‌کند و طی این عمل مقدار بسیار زیادی انرژی تولید می‌گردد. مرتبه بزرگی فشار در حدود 5000(atm) اتمسفر و مرتبه بزرگی دما در حدود

#### 1- مقدمه

پدیده انفجار سال‌های زیادی است که مورد نظر دانشمندان و محققان بسیاری بوده است. در ابتدا انفجار بیشتر از جنبه تخریبی آن مورد بررسی قرار می‌گرفته است. اما با کنترل انرژی آزاد شده در انفجار می‌توان از آن در کاربردهای مختلفی استفاده کرد. یکی از انفجارها که بر روی آن تحقیقات فراوانی صورت گرفته است، بحث انفجار زیر آب می‌باشد. سرعت زیاد حرکت موج در آب نسبت به هوا، ایجاد حباب گاز درون محیط مایع، نوسانات حباب ایجاد شده و تولید جت پرسرعت آب باعث شده است که پدیده انفجار زیر آب با انفجار در هوا تفاوت‌های اساسی داشته باشد.

#### 2- پیشینه فعالیت‌های انجام شده

1. Mindlin
2. Bleich
3. Transverse
4. Huang
5. Haxton
6. Haywood
7. Doubly Asymptotic Approximation
8. Geer
9. Randall
10. Fox
11. Kwon
12. Nelson
13. Bergerson

3000°C درجه‌ی سانتی‌گراد می‌باشد. اگر انفجار در محیط آب اتفاق افتد با توجه به اینکه آب قابلیت تحمل تنش برشی را ندارد در نتیجه در اثر فشار زیاد ایجاد شده بعد از انفجار در محیط آب جریانی القاء می‌شود که کیفیت و کمیت این جریان وابسته به شرایط انفجار ایجاد شده دارد.

## 2-2- موج ضربه ای

غالباً امواج ضربه‌ای انتشار یافته از طرق اجسام مادی، با سطوح آزاد و یا مرزهای مشترک مواجه می‌شوند. که رفتار آنها نسبتاً پیچیده و در نتیجه به‌منظور شبیه سازی این رفتار می‌باید توجه خود را محدود کرد به تشریح اینکه امواج چگونه انعکاس و انتشار می‌یابند. جزئیات ریاضی رفتار، مورد نیاز برای آنالیز این وضعیت‌ها در مراجع [11-9] قابل دستیابی است.

## 2-2-1- انعکاس موج ضربه ای

رفتار موج ضربه‌ای و انعکاس آن به‌طور کلی به دو دسته منظم و نامنظم تقسیم می‌شود [9 و 10]. امواج ضربه‌ای ضعیف با انعکاس منظم در فشارهای پایین رخ می‌دهند و امواج ضربه‌ای ضعیف و قوی با انعکاس نامنظم در فشارهای بالا یا در مواد تراکم پذیر رخ می‌دهند. لازم به‌ذکر است در این پژوهش انعکاس موج ضربه‌ای از نوع انعکاس منظم مورد نظر می‌باشد.

طی متراکم شدن مواد در جبهه موج ضربه‌ای، در اثر اصطکاک بین مولکول‌ها دما افزایش می‌یابد. در صورتی که انرژی ایجاد شده امکان انتقال از جبهه موج را بیابد، موج به‌عنوان موج ضربه‌ای قوی تعریف می‌شود. در فشارهای پایین این حالت روی نمی‌دهد و امواج پروسه‌ای آیزنروتروپیک که از لحاظ ترمودینامیکی بازگشت پذیر است (آدیاباتیک برگشت پذیر) طی می‌کنند.

## 2-2-2- تئوری انتشار امواج در مواد الاستیک

انتشار موج تنش را می‌توان توسط معادلات حرکت که در بردارنده ترم‌هایی از قبیل جابجایی ذرات می‌باشد، تعریف کرد [12]. مؤلفه های حرکت سه بعدی  $u, v, w$  در جهات  $x, y, z$  به ترتیب معادلات (1) تا (3) را ارضاء می‌کنند.

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial e}{\partial x} + \mu \nabla^2 u \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial e}{\partial y} + \mu \nabla^2 v \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial e}{\partial z} + \mu \nabla^2 w \quad (3)$$

که در آن  $\rho$  چگالی ماده جامدی است که موج تنش از آن عبور می‌کند.

$\Delta$ : تغییر حجم واحد حجم ماده<sup>14</sup>

$$\Delta = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \quad (4)$$

$\lambda$ : عبارتست از ضریب لامه، که معادل است با:

$$\lambda = K + \frac{2\mu}{3} \quad (5)$$

## 3- دستگاه معادلات دینامیکی محیط سیال

## 3-1- معادلات آکوستیک<sup>15</sup>

معادله تعادل ذرات سیال با فرض کوچک بودن حرکت ذرات، تراکم‌پذیری، آدیاباتیک بودن و تلفات اندازه حرکت مرتبط با سرعت، به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \gamma(x, \theta_1) \dot{u}^f + \rho_f(x, \theta_1) \ddot{u}^f = 0 \quad (6)$$

که  $P$  اضافه فشار در سیال (فشاری علاوه بر فشار استاتیکی سیال)،  $x$  موقعیت مکانی ذره سیال،  $\dot{u}^f$  سرعت ذره سیال،  $\ddot{u}^f$  شتاب ذره سیال،  $\rho_f$  چگالی سیال،  $\gamma$  درگ حجمی سیال و  $\theta_1$  متغیرهای مستقلی مانند دما، رطوبت هوا و یا شوری آب هستند که ممکن است وابسته به  $P_f$  و  $\gamma$  باشند.

معادله دالامبر (6) با فرض وجود جریان دائمی سیال و صرفنظر از ترم همرفت نوشته شده‌است. این فرض برای سرعت‌های دائمی سیال تا 0.1 ماخ از دقت خوبی برخوردار است.

رفتار سیال غیر لزج، خطی و تراکم‌پذیر فرض می‌شود، لذا:

$$p = -K_f(x, \theta_1) \frac{\partial}{\partial x} \cdot u^f \quad (7)$$

که  $K_f$  مدول حجمی سیال می‌باشد.

با توجه به امکان وقوع کاویتاسیون در محیط آب، فشار کل نمی‌تواند کمتر از حد فشار کاویتاسیون باشد. لذا وقتی فشار کل در محیط سیال به مقداری کمتر از حد فشار کاویتاسیونی کاهش یابد، بدون آنکه افتی در فشار دینامیکی رخ دهد، سیال شروع به انبساط می‌کند. در این حالت رابطه ساختاری (7)، به شکل زیر بیان می‌شود:

$$p = -K_f(x, \theta_1) \frac{\partial}{\partial x} \cdot u^f \quad (8)$$

به‌طوریکه  $P_v$  ترم شبه فشار و به معنی تغییر در حالت ماده می‌باشد و با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$p_v = -K_f(x, \theta_1) \frac{\partial}{\partial x} \cdot u^f \quad (9)$$

به‌طوریکه  $P_c$  حد فشار کاویتاسیون و  $P_0$  فشار استاتیکی اولیه در هر نقطه از سیال می‌باشد.

## 3-2- فرمولاسیون انتگرال گیری مستقیم دینامیک‌های گذرا

برای استخراج معادله دیفرانسیل با مشتقات جزئی مورد استفاده در انتگرال گیری مستقیم آنالیز گذرا، ابتدا با تقسیم معادله (6) بر  $P_f$ ، مشتق آن را نسبت به  $x$  گرفته و در نهایت با صرفنظر کردن از مشتق  $\gamma / \rho_f$  کوچک، نتایج را با مشتقات زمانی معادله (7)

ترکیب نموده تا معادله حرکت سیال بر مبنای فشار بدست آید:

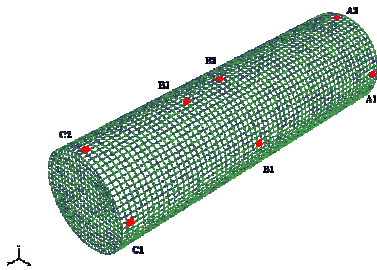
$$\frac{1}{K_f} \ddot{p} + \frac{\gamma}{\rho_f K_f} \dot{p} - \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left( \frac{1}{\rho_f} \frac{\partial p}{\partial x} \right) = 0 \quad (10)$$

فرم ضعیف شده معادل برای معادله حرکت (10) با در نظر گرفتن

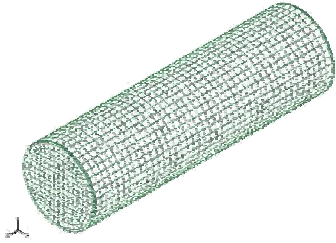
میدان متغیر دلخواه  $\delta p$  و انتگرال گیری روی سیال بدست می‌آید:

$$\int_{V_f} \delta p \left( \frac{1}{K_f} \ddot{p} + \frac{\gamma}{\rho_f K_f} \dot{p} - \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left( \frac{1}{\rho_f} \frac{\partial p}{\partial x} \right) \right) dV = 0 \quad (11)$$

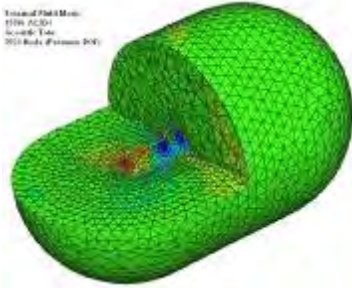
با استفاده از تئوری گرین خواهیم داشت:



شکل 1: مدل اجزاء محدود محافظه استوانه ای



شکل 2: مدل اجزاء محدود لاستیک

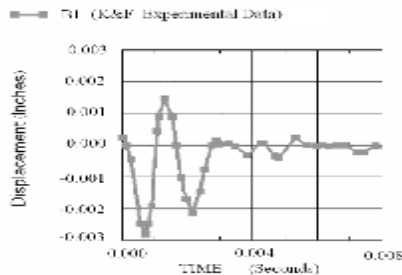


شکل 3: مدل اجزاء محدود محافظه استوانه ای به همراه محیط سیال

مطابق شکل 1 کلیه ی موقعیت هایی که مورد آنالیز قرار خواهند گرفت عبارتند از: 3 المان در بخش مرکزی محافظه استوانه ای (B1, B2, B3)، 2 المان در لبه انتهایی چپ (C1, C2) و 2 المان در لبه انتهایی راست (A1, A2).

### 7- صحت سنجی

برای صحت سنجی روش تحلیل مورد استفاده در نرم افزار ABAQUS 6-7، مدل سازی سازهای که نتایج تست آزمایشگاهی آن در دسترس است، انجام شده است. این سازه سیلندری غوطه ور است که تحت امواج ضربه ای ناشی از انفجار زیر آب قرار گرفته است و در تحقیقات وان و فاکس [7] نیز مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفته است.



شکل 4: جابجایی در موقعیت B1 (داده های آزمایشگاهی)

$$\int_{V_0} \left[ \rho_f \left( \frac{\partial u}{\partial t} \right)^2 + \rho_f \left( \frac{\partial v}{\partial t} \right)^2 + \rho_f \left( \frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 \right] dV + \int_{V_0} \left[ \rho_f \left( \frac{\partial u}{\partial t} \right)^2 + \rho_f \left( \frac{\partial v}{\partial t} \right)^2 + \rho_f \left( \frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 \right] dV - \gamma \quad (12)$$

که در آن  $\bar{n}$  بردار نرمال بر مرز به سمت داخل سیال است. رفتار سازه با استفاده از معادله کار مجازی به شکل زیر تعریف می شود:

$$\int_{V_0} \left[ \rho_f \left( \frac{\partial u}{\partial t} \right)^2 + \rho_f \left( \frac{\partial v}{\partial t} \right)^2 + \rho_f \left( \frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 \right] dV + \int_{V_0} \left[ \rho_f \left( \frac{\partial u}{\partial t} \right)^2 + \rho_f \left( \frac{\partial v}{\partial t} \right)^2 + \rho_f \left( \frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 \right] dV - \gamma \quad (13)$$

به طوریکه  $\sigma$  تنش در نقطه ای از سازه،  $p$  فشار اعمالی در سطح مشترک سیال - سازه،  $n$  نرمال بر سازه به سمت خارج،  $\rho$  چگالی ماده،  $\alpha_c$  ضریب جرمی نسبی میرایی (قسمتی از فرض ضریب دمپینگ رایلی برای سازه)،  $\dot{u}^m$  و  $\ddot{u}^m$  به ترتیب، شتاب و سرعت در نقطه ای از سازه،  $t$  نیروی سطحی اعمالی بر سازه،  $\delta u^m$  میدان تغییراتی جابجایی و  $\delta \epsilon$  که عبارتست از تغییرات کرنش که متناسب است با  $\delta u^m$ .

### 4- شرایط آزمون شبیه سازی

ماده منفجره به وزن 25 کیلوگرم و از نوع HBX-1 در فاصله 7/62 متری از محافظه استوانه ای قرار گرفته است. مشخصات هندسی محافظه استوانه ای و منبع انفجار در جدول 1 آمده است: محافظه استوانه ای به طور افقی در عمق 3/66 متری از یک استخر به عمق 40 متر قرار دارد. مدل های محافظه استوانه ای با پوشش، ابعادی همانند با مدل فلزی (مدل بدون پوشش) دارد، با این تفاوت که سطح خارجی آن توسط لایه های لاستیک پوشانده شده است.

جدول 1: مشخصات هندسی محافظه استوانه ای و منبع انفجار

طول	قطر خارجی	ضخامت جداره محافظه استوانه ای	فاصله منبع انفجار تا سازه
1,067(m)	0,303(m)	6,35(mm)	7,62(m)

### 6- مش بندی (ایجاد شبکه اجزاء محدود)

برای مدل سازی بخش فلزی از المان های پوسته ای  $S4R^{16}$  و پوشش لاستیکی از المان های جامد  $C3D8^{17}$  اجزاء محدود استفاده شده است. به ترتیب این مش بندی برای بخش فلزی شامل 4410 گره و 4288 المان و برای پوشش لاستیکی شامل 4700 گره و 2520 المان می باشد. مدل اجزاء محدود محافظه استوانه ای و لاستیک در شکل های 1 و 2 نشان داده شده است. مدل اجزاء محدود متشکل از میدان سیال و انفجار در شکل 3 نشان داده شده است. سیال خارجی توسط المان های  $AC3D4^{18}$  مدل شده است. مدل سیال از تعداد 3923 گره و 15586 المان تشکیل شده است.

16. Linear quadrilateral elements  
17. Linear hexahedral elements  
18. Linear tetrahedral elements

پوشش به معنی کمترین مقادیر تغییر فرم، کرنش، کرنش پلاستیک و انرژی داخلی سازه می‌باشد.

جدول 2: نتایج تحلیل در خصوص بهترین ضخامت پوشش

نتایج		بهترین ضخامت پوشش
A1		
m 0,01905	LE11	کرنش
m 0,01905	LE22	
m 0,01905	U1	جلجایی
m 0,00635	U2	
m 0,01905	PEEQ	کرنش پلاستیک
m 0,0254	ALLIE	انرژی داخلی

### 9- نتیجه گیری

به‌طور کلی نتایج حاکی از آن است که:

- 1- دامنه نوسانات مدل دارای پوشش نسبت به مدل بدون پوشش بزرگتر است.
- 2- پاسخ محفظه استوانه‌ای دارای پوشش در تمامی موقعیت‌ها، به‌طور قابل ملاحظه‌ای با افزایش ضخامت پوشش تا ضخامت m 0,01905 بهبود می‌یابد.
- 3- نتایج بدست آمده در اثر تغییر ضخامت پوشش، دلالت بر وجود مقداری حدی (m 0,01905) برای ضخامت دارد، به‌طوری‌که به ازای مقادیر پایین‌تر و بالاتر از آن محفظه استوانه‌ای پاسخ شدیدتری از خود نشان می‌دهد.

### مراجع

- [1] Mindlin, R.D. and Bleich, H.H. (1953), "Response of an elastic cylindrical shell to a transverse step shock wave".
- [2] Huang, H. (1969), "Transient interaction of plane acoustic waves with a spherical shell".
- [3] Haxton, R.S., Haywood, J.H. and Hunter, I.T. (1991), "Nonlinear inelastic response of an infinite cylindrical shell to underwater shock loading".
- [4] Geers, T.L. (1978), "Doubly Asymptotic Approximations for transient motions of submerged structures".
- [5] Randall, R.J. (1986), "Underwater shock trials on a plain cylinder", Shock & Vibration Bulletin, 56, 1, 107-119.
- [6] Nelson, K.W., Shin, Y.S., Kwon, Y.W., "Failure of Aluminum Cylinder from Underwater Shock Effects".
- [7] Fox, P.K., Kwon, Y.W., Shine, Y.s., "Nonlinear Response of Cylindrical Shells to Underwater Explosion: Testing and Numerical Prediction Using VEC/DYNA3D", Report NPS-ME-92-002, Naval Postgraduate School, Monterey, CA, March 1992.
- [8] Kwon, Y.W., Bergersen, J.K., Shine, Y.s., "Effect of Surface Coatings on Cylinders Subjected to Underwater Shock".
- [9] Ben-Dor, G. "Shockwave reflection phenomena". 1992. New York: Springer-Verlag.
- [10] Ben-Dor, G., Lagra, O., and Elperin, T. "Handbook of shockwaves". 2001. London: Academic press.
- [11] Ridah, S. "Shock waves in water. Journal of Applied Physics", 64(1): p. 152-158. 1988.



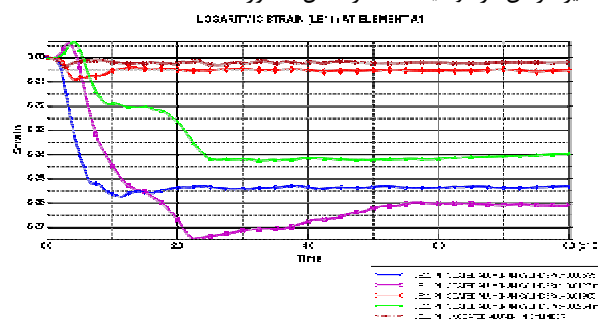
شکل 5: جلجایی در موقعیت B1 (نتایج تحلیل عددی)

ماکزیمم مقدار جابجایی محاسبه شده در موقعیت B1 توسط کد ABAQUS مقدار m 0,0029 در مقایسه با مقدار تجربی m 0,0028 می‌باشد. که انحراف در ماکزیمم تغییر فرم به دست آمده از دو روش 3,5% درصد می‌باشد.

### 8- نتایج

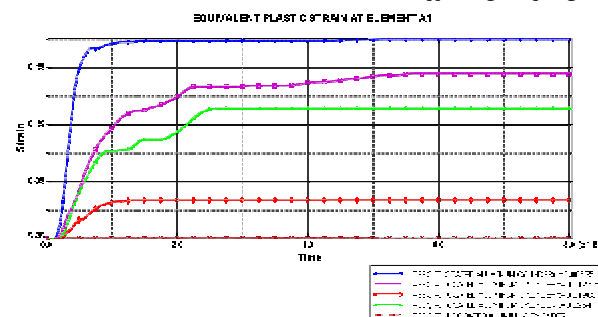
با توجه به تقارن هندسی محفظه استوانه‌ای نسبت به صفحه XY، داده‌های موقعیت A1، بر روی محفظه استوانه‌ای، مورد بررسی قرار گرفته است. در ضمن از آنجا که در نمودارهای تنش و کرنش رویدادهای یکسانی روی می‌دهد، نمودارهای کرنش به جای نمودار تنش آورده شده‌است.

مقادیر کرنش در موقعیت A1، در شکل 6 آورده شده‌است.



شکل 6: کرنش LE11 در موقعیت A1

اثر ضخامت لاستیک در مقادیر به‌دست آمده برای کرنش پلاستیک معادل، در شکل 7 آورده شده‌است.



شکل 7: کرنش پلاستیک معادل در موقعیت A1

در جدول 2 خلاصه‌ای از نتایج در خصوص بهترین ضخامت پوشش در نقطه A1، آورده شده‌است. لازم به ذکر است بهترین ضخامت

[12] Kolsky, H., *Stress Wave in Solids*, Clarendon Press, Oxford, pp. 211, 1963.