ماهنامه علمى پژوهشى

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

ارزیابی رفتار انبساط شعاعی استوانه جدار ضخیم تحت بارگذاری انفجاری داخلی به همراه تحليل عددي

سید مسعود باقری¹، جمال زمانی اشنی ^{*2}

1- دانشجوی دوره دکترای تخصصی، مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

2- دانشیار و عضو هیئتعلمی، مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

* تەران، صندەت بىستى 1999-1935، zamani@kntu.ac.ir

تهران، حسدوق پستی ۲۰٬۰ ۲۰٬۰۰۰			
اطلاعات مقاله	چکیدہ		
مقاله پژوهشی کامل دریافت: 27 آبان 1393 ارائه در سایت: 19 بهمن 1393 ک <i>لید واژگان:</i> ماده منفجره مادله حالت معادله حالت نرخ کرنش	نظر به کاربردهای فراوان استوانههای جدار ضخیم، اطلاع از رفتار اینگونه سازهها از اهمیت فراوانی برخوردار است. روابط بسیاری درخصوص رفتار استوانهها و کرههای حاوی ماده منفجره بدست آمده است که عمدتاً متکی بر مدلهای تجربی است. از این رو استخراج مدل تحلیلی در سازههای تحت بارگذاری داخلی و با نرخ بالا مانند فرآیندهای انفجاری در استوانهها، از اهمیت ویژهای برخوردار است. هدف اصلی این مقاله، استخراج مدل ریاضی انبساط استوانه جدار ضخیم ایزوتروپیک آلومینیومی حاوی ماده منفجره تی این.تی می باشد که در آن، رفتار ماده منفجره بصورت معادله حالت LWL درنظر گرفته شده است. مدل استحکامی در تحلیل حاضر بر پایه معادله کوپر –سایموند می باشد که نرخ کرنش بصورت معادله حالت LWL درنظر گرفته شده است. مدل استحکامی در تحلیل حاضر بر پایه معادله کوپر –سایموند می باشد که نرخ کرنش محصولات انفجاری بعنوان شرایط مرزی و همچنین وجود نرخ کرنش لحظهای و تأثیر آن بر استحکام دینامیکی ماده، از ناهمیت و سرعت منصولات انفجاری بعنوان شرایط مرزی و همچنین وجود نرخ کرنش لحظهای و تأثیر آن بر استحکام دینامیکی ماده، از نکات حائز اهمیت و شعاعی استخراج می گردد و با درنظر گرفتن شرایط مرزی و هندسی لحظهای و تأثیر آن بر استحکام دینامیکی ماده، از نکات حائز اهمیت و منصورت انفجاری بعنوان شرایط مرزی و همچنین وجود نرخ کرنش لحظهای و تأثیر آن بر استحکام دینامیکی ماده، از نکات حائز منعص بفرد در این مقاله محسوب می شود. با ارائه معادلات تعادل در استوانههای جدار ضخیم، معادله تنش های شعاعی و محیطی و سرعت منعاعی استوانه استخراج می گردد و با درنظر گرفتن شرایط مرزی و هندسی لحظهای و اصلاح تنش دینامیکی ماده، از نکات حائز شعاعی استوانه استخراج می گردد و با درنظر گرفتن شرایط مرزی و هندسی لحظهای و اصلاح تنش دینامیکی ماده باز ورزیابی قرار شعاعی آن با حل معادله دیفرانسیل مربوطه، محاسه می گردد. پس از استخراج سرعت شعایی سایر مادلات تنش مورد بررسی و ارزیابی قرار خواهد گرفت. در ادامه، شبیهسازی نرمافزاری باتوجه به مفروضات، به منظور بررسی روند کلی نتایج حاصل از مدلسازی، با نرمافزار اُتوداین انحام شد که تطابق خوبی را با نتایج حاصل از تحلی باتها، مردهد.		
ه حالت کرنش	منحصر بفرد در این مقاله محسوب میشود. با ارائه معادلات تعادل در استوانههای جدار ضخیم، معادله تنش های شعاعی و محیطی و سرعت شعاعی استوانه استخراج میگردد و با درنظرگرفتن شرایط مرزی و هندسی لحظهای و اصلاح تنش دینامیکی ماده باتوجه به نرخ کرنش، سرعت شعاعی آن با حل معادله دیفرانسیل مربوطه، محاسبه میگردد. پس از استخراج سرعت شعاعی، سایر معادلات تنش مورد بررسی و ارزیابی قرار خواهد گرفت. در ادامه، شبیهسازی نرمافزاری باتوجه به مفروضات، به منظور بررسی روند کلی نتایج حاصل از مدلسازی، با نرمافزار اُتوداین انجام شد که تطابق خوبی را با نتایج حاصل از تحلیل نشان میدهد.		

Evaluation of radial expansion behavior of thick-walled cylinder under internal explosive loading with numerical analysis

Seyed Masood Bagheri, Jamal Zamani Ashni*

Department of Mechanical Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran * P.O.B. 19395-1999 Tehran, Iran, zamani@kntu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION ABSTRACT

Original Research Paper Received 18 November 2014 Knowing the behavior of thick-walled cylinders, due to their numerous applications is important. There are numerous relationships for cylinders and spheres containing explosives which have Accepted 07 January 2014 been found, based mainly on other experimental models. Hence, developing an analytical model of Available Online 08 February 2015 the behavior of structures under internal and high-rate loading, like explosion in the cylinders, is of great importance. The main objective of this paper is to derive a mathematical model of Keywords: isotropic thick-walled aluminum cylinder containing TNT in which JWL equation of state is Thick-Walled Cylinder considered for behavior of explosive expansion. The present analysis is based on the Cowper-Dynamic Yield Stress Symonds material model, in which strain rate at each moment is used for calculation of dynamic Equation of State strength. Therefore, given the instantaneous explosive pressure boundary conditions as well as Strain Rate instantaneous strain rate and its impact on the dynamic strength of the material, is of significant technique in this paper. By employing equations of equilibrium in thick-walled cylinders, the equations of radial and circumferential stresses and radial velocities were derived. The instantaneous geometric and boundary conditions and corrected dynamic stress of material with respect to the strain rate used to calculate radial velocity through solving the differential equation of motion. After extraction of radial velocity, other stress equations will be evaluated. Furthermore, by considering the assumptions and in order to assess the overall results of the analytical modeling, computer simulation was done using Autodyn software, which shows good agreement with the analytical results.

پدیدههای انفجار و نفوذ پرتابههای باسرعت بالا [3,2] و غیره همواره مورد توجه محققین بسیاری قرار گرفته است. 1- مقدمه

در این راستا دستیابی به مدل تحلیلی جامع در تحلیل هندسههای جدار

مطالعه رفتار دینامیکی استوانههای جدار ضخیم در شرایط و هندسههای مختلف و در کاربردهای گوناگون مانند تجهیزات و مخازن تحت فشار [1]،

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Explosive

ضخیم بسیار حائز اهمیت است. بسیاری از مطالب در سایر حوزههای مکانیک مانند ارزیابی پوستهپوستهشدن و ترکش [4-7]، همچنین آزمایش استوانه در استخراج ضرایب معادلات ماده منفجره ناشناخته [8] و فرآیندهای اتوفرتاژ¹ [9]، به دانستن رفتار و معادلات حاکم مربوطه وابسته است.

اولین گامهای مطالعاتی، بررسی رینگهای جدار ضخیم و حالات تنش و سرعت انبساط در آن با توجه به نرخ کرنش بالای حاصل از بارگذاریهای الکترومغناطیسی بوده است [11,10]. هرچند برخی سعی بر تعمیم نتایج حاصل از این تحلیلهای در حالت استوانههای جدار ضخیم داشتهاند [12]، اما باید گفت این تحلیلها حالت دوبعدی داشته و نتایج حاصله تطابق خوبی با نتایج تحلیل در استوانههای جدار ضخیم ندارد.

از جمله اولین تحلیلهای جامع و کامل در حوزه جدار ضخیم توسط الحسنی و جونز [13] در فرآیند انبساط و ترکش شدن کُره جدار ضخیم حاوی ماده منفجره انجام شد. هدف این تحلیل دستیابی به سرعت انبساط حالات تنش و در نهایت پوسته پوسته شدن و ترکش آن بوده است. از جمله معایب اصلی این تحلیل که بعنوان مفروضات مسئله نیز درنظر گرفته شده، این است که ماده بصورت صلب کاملاً پلاستیک بدون وابستگی به نرخ کرنش، مورد تحلیل قرار گرفته است.

آنچه که در تحلیلها حائز اهمیت است دستیابی به مدل مادی و تکنیکهای حل مسئله میباشد. از اینرو، تحلیلهای دیگری در حالت انفجار به بیرون² و انفجار به داخل³ با درنظرگرفتن روابط ویسکوپلاستیک⁴ انجام شده است [14]. مدل ویسکوپلاستیک در ارزیابی استوانهها از مدل مادی مواد متخلخل استخراج شده است. در این تحلیل، شرایط مرزی داخلی مربوط به فشار گاز، از روابط ترمودینامیکی تحلیلی استخراج شده است. هرچند تحلیل صورت گرفته رفتار مواد در تمامی جداره را بررسی نمیکند، اما معادلات مربوطه در مرزها، تطابق خوبی را با نتایج شبیهسازی نشان میدهد.

تکنیک بکارگیری روابط ویسکوپلاستیک در مدل مادی و استفاده از مدل هورومسر⁵ و پراگر⁶ در حالت عمومی نیز بکارگرفته شده است [15]. دستیابی به تابع ویسکوپلاستیک از طریق حل معادله تعادل در استوانه و دستیابی به معادله درجه دوم دیفرانسیلی باتوجه به اعمال شرایط مرزی، پیشنهاد شده است [16]. حل معادله مربوطه با صرفنظرکردن از اثرات اینرسی و ویسکوزیته انجام شده است. از آنجایی که یافتن تابع تحلیلی ویسکوپلاستیک بسیار دشوار است لذا میتوان آن را بصورت تخمینی درنظرگرفت که این کار با لحاظ تابعی در خصوص بیان سرعت شعاعی بر حسب مکان و زمان انجام شده است [15]. بنابراین ضعف عمده این دیدگاه تخمین جواب و تحلیل آن میباشد.

در بسیاری از استوانههای جدارضخیم، رفتار ماده بادرنظرگرفتن مدل مادی، بصورت کرنش سختی و یا نرخ کرنش سختی مورد توجه قرار گرفته است [18.17]

درخصوص انواع بارگذاریها میتوان گفت که بارگذاری در استوانهها عمدتاً شامل بارگذاری داخلی بوده است. هرچند برخی از محققین بارگذاری متغیر در استوانههای جدار ضخیم برحسب توابع کسینوسی را مورد بررسی قراردادهاند که در حل آنها، بسط فوریه بکار گرفته شده است [19]. برخی نیز برروی اعمال فشار داخلی و خارجی بصورت توأمان نیز به تحقیق و

بررسی پرداختهاند [20.14]. بارگذاری حدّی و آستانه دستیابی به نقطه پلاستیک همراه با بکارگیری الگوریتمهای متفاوت، از موارد مطلوب در ارزیابی رفتار استوانههای جدار ضخیم است [22،21،17]. روابط مربوط به استوانههای جدارضخیم بدون درنظرگرفتن جمله شتابگیری و در حالت الاستیک، در تحلیلها اعمال شده است.

از اینرو دستیابی به رفتار استوانههای جدار ضخیم تحت بارگذاری با نرخ بالا مانند انفجار بههمراه مدل مادی مناسب و بیان تحلیلی آن ضرورت دارد.

در این مقاله به پدیده انبساط استوانه توخالی جدار ضخیم حاوی ماده منفجره و پارامترهای آن مانند جابجایی شعاعی، سرعت انبساط، وضعیت تنش شعاعی و محیطی⁷ و تغییرات استحکام ماده در حین فرآیند پرداخته میشود. تحقیقات با ارائه روش تحلیلی انبساط استوانهای جدار ضخیم، سرعت شعاعی آن و بررسی حالات تنش در آن آغاز و پس از معرفی معادلات مربوط، نتایج تحلیل بکار گرفته شده در استوانهای آلومینیومی با ابعاد مشخص ارائه می گردد. در ادامه تحقیق، شبیهسازی باتوجه به پارامترهای فرضی فیزیکی و مقادیر اولیه، انجام و دادههای حاصل از شبیهسازی نرمافزاری با نتایج تحلیلی مورد مقایسه و ارزیابی قرار می گیرد. نکته کلیدی در تحلیل روابط استخراج سرعت شعاعی است که باتوجه به محاسبه آن می توان تغییرات شعاع استوانه و همچنین شتاب گیری و حالات تنش در جداره را مورد تحلیل قرار داد.

معادلات حاکم بر رفتار استوانه جدار ضخیم معادلات پایهای استوانه جدار ضخیم

با توجه به شکل 1 و در نظر گرفتن نیروهای شعاعی و محوری و برقراری تعادل در حالت استاتیک در جهت شعاعی، میتوان رابطه تعادلی تنش در حالت استاتیک را بصورت رابطه (1) درنظر گرفت [1]:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = \mathbf{0} \tag{1}$$

معادله (1) در حالت استاتیک کاربرد دارد و در حالت دینامیک و درنظرگرفتن حرکت برای المان موردنظر به فرم معادله حرکت زیر تبدیل می شود که جمله حاصل ضرب چگالی در شتاب به آن اضافه شده است [13]. طبق رابطه (2) داریم:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = \rho \frac{dv_r}{dt} = \rho \dot{v}_r$$
⁽²⁾

2-2- معادلات حالت محصولات انفجاري

در این تحلیل از معادله حالت JWL⁸ استفاده می شود. معادله حالت JWL فشار تولید شده ناشی از آزاد شدن انرژی شیمیایی در یک ماده منفجره را مدل می کند. این مدل بهعنوان یک احتراق از پیش تعیین شده به کار برده می شود به این معنی که واکنش و شروع انفجار توسط شوک در ماده تعریف نمی شود. به جای آن، زمان آغاز به صورت هندسی با استفاده از سرعت موج انفجار و فاصله نقطه ماده از نقاط انفجاری تعیین می شود [23]. این معادله حالت معمولاً برای مدل کردن محصولات ناشی از انفجار مواد سوختار شدید⁹ مورد استفاده قرار می گیرد.

 معادله حالت JWL ظاهری ساده داشته و استفاده از آن بسیار راحت است.

7- Radial and tangential Stress

8- Jones-Wilkins-Lee

9- high explosive

¹⁻ Autofrettage

²⁻ Divergent 3- Convergent

⁴⁻ Viscoplastic

⁵⁻ Hohromser

⁶⁻ Prager

^{100410344.13.4.12.5.2.1.1 [1.1.2.6.01108000]}



شکل 1 المانی از یک جسم استوانهای شکل بههمراه مؤلفههای مربوطه

- 2- در تعیین معادله حالت JWL برای یک ماده منفجره، مشخص بودن اجزاء تشکیل دهنده ماده منفجره و محصولات انفجار، بر خلاف بسیاری از معادلات حاکم دیگر لازم نیست.
- 5- با توجه به بررسیهای انجام شده بسیاری از معادلات حالت پیشنهادی برای مواد منفجره در هیدروکدها، به درستی نمیتوانند رفتار ماده منفجره را بیان کنند؛ اما معادله حالت JWL تطابق رفتاری خوبی را در مقایسه با نتایج تجربی نشان میدهد.

شکل کلی معادله حالت JWLبصورت رابطه (3) میباشد [23].

$$P(V) = Ae^{-R_1V} + Be^{-R_2V} + CV^{-(\omega+1)}$$
(3)

که در آن پارامترهای $A, B, C, R_1, R_2, \omega$ مقادیر ثابت و P و V به ترتیب فشار و حجم بدون بُعد میباشند. با درنظر گرفتن رفتار آیزنتروپیک برای محصولات انفجار، مقدار انرژی داخلی E(V) با انتگرال گیری از معادله فشار، بصورت رابطه (4) درنظر گرفته می شود:

$$E(V) = -\int P dV = \frac{A}{R_1} e^{-R_1 V} + \frac{B}{R_2} e^{-R_2 V} + \frac{C}{\omega} V^{-\omega}$$
(4)

با انبساط محصولات انفجاری مقدار E به سمت صفر میل پیدا می کند. با مرتب کردن عبارت (4) بر حسب مقدار C رابطه (5) را خواهیم داشت:

$$C = \omega V^{\omega} \left[E - \frac{A}{R_1} e^{-R_1 V} + \frac{B}{R_2} e^{-R_2 V} \right]$$
(5)

با جایگزینی معادله (5) در (3) صورت دیگر معادله حالت JWL به فرم رابطه (6) بدست میآید:

$$P = A \left[\mathbf{1} - \frac{\omega}{R_1 V} \right] e^{-R_1 V} + B \left[\mathbf{1} - \frac{\omega}{R_2 V} \right] e^{-R_2 V} + \frac{\omega}{V} E$$
(6)
automatic orbit and the set of the set of

2-3-مدل استحكام و تسليم ديناميكي

استحکام تسلیم دینامیکی¹ مواد را میتوان بصورت رابطه (7) درنظر گرفت [24]:

$$\frac{o_{Yd}}{\sigma} = f(\varepsilon)g(\varepsilon) \tag{7}$$

که $\sigma_{Y} e f(e)$ به ترتیب تنش استاتیک و دینامیکی، $(\hat{e}) f$ تابع حساسیت به نرخ کرنش، (e) g تابع کرنش سختی ماده و \hat{e} نرخ کرنش است. با صرفنظر از اثرات کرنش سختی، میتوان نوشت: f(e) g(e) . پارامتر حساسیت به نرخ کرنش $(\hat{e}) f$ که به معادله کوپر -سایموند² شناخته می شود را میتوان بصورت رابطه (8) درنظر گرفت [25]:

$$\frac{\sigma_{\text{Dynamic}}}{\sigma_{\text{Static}}} = \mathbf{1} + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{D}\right)^{1/q} \tag{8}$$

که D و p ضرایب ثابتی هستند که از آزمایشها استخراج میشوند. این مدل برپایه فرضیاتی مبنی بر تئوری بارگذاری دینامیکی حالت پلاستیک صلب میباشد و بر همین اساس وابستگی نرخ کرنش به تنش تسلیم را بیان میدارد.

3- روش تحليل ارائه شده در اين تحقيق

3 -1- فرضيات حاكم

در این تحقیق، برخی از سادهسازیها و فرضیات به شرح ذیل صورت گرفته است:

 در تحلیل تئوری و شبیهسازی، ماده بصورت کاملاً پلاستیک به همراه معیار تسلیم ترسکا³ درنظر گرفته شده است که در آن، مدل استحکامی از رابطه کوپر-سایموند تبعیت می شود.

 در تحلیل و شبیه سازی، طبق مدل مادی مربوطه، تنش سیلان تسلیم وابسته به نرخ کرنش و مستقل از کرنش سختی و تغییرات دمایی (به سبب کار پلاستیک) است.

 حجم ماده خالص تشکیلدهنده استوانه، در حین فرآیند ثابت در نظر گرفته می شود و از این رو، تغییرات حجم دیواره ثابت فرض می گردد.

• در تحلیلها، روابط مربوط بارگذاری موج شوک درنظر گرفته نمیشود.

 فرض می گردد که انفجار بصورت خطی و از محور استوانه به سمت بیرون انجام می شود.

 در مدل تحلیلی فرض می گردد که در لحظه آغاز انفجار، نیروی فشاری به جداره داخلی استوانه وارد می شود در حالیکه در فرآیند شبیه سازی، زمان انفجار کامل ماده منفجره و اعمال فشار بر جداره داخلی حدود 1/8 میکروثانیه می باشد که در شبیه سازی، تأخیر زمانی فشار ایجاد شده اعمال شده است.

3-2-ارائه رابطه تحليلي

روش تحقیق و تحیل تئوری در این مقاله برمبنای بنیانگذاری روابط تنش باتوجه به درنظر گرفتن استحکام دینامیکی ماده و شرایط مرزی حاصل از معادلات حالت محصولات انفجاری می باشد. در ادامه، باتوجه به معادلات تعادل، معادلهای دیفرانسیلی به منظور محاسبه سرعت انبساط استخراج و با حل آن و درنظر گرفتن استحکام دینامیکی و بارگذاری داخلی و معادلات حالت محصولات انفجاری، مقادیر سرعتها و تنش ها حاصل می گردد. نمودار شرایط مرزی استوانه مذبور در شکل 2 ارائه شده است.

¹⁻ Dynamic Yield Strength

²⁻ Cowper-Symonds 3- Tresca

³⁻ Tres



$$r = b \times a = 0 \times a^{-1} + p \times a^{-1} + a \times a^{-1} = a^{-1} + \frac{1}{2} \rho v_a^2 a^2 \left(\frac{1}{r^2} - \frac{1}{a^2}\right) - P_a$$
(17)

با در نظر گرفتن روابط (16) و (17) و اعمال شرایط مرزی $\sigma_r = \mathbf{0}$ در r = b رابطه (18) را خواهیم داشت:

$$P_{a} = (\sigma_{Y} + \rho v_{a}^{2} + \rho a \dot{v}_{a}) \ln \frac{b}{a} + \frac{1}{2} \rho v_{a}^{2} a^{2} \left(\frac{1}{b^{2}} - \frac{1}{a^{2}}\right)$$
(18)

با حل معادله (18) عبارتی بصورت زیر برای سرعت شعاعی با درنظرگرفتن فشار ثابت P_a برای استوانه بدست میآید. طبق رابطه (19) داریم:

$$\dot{v}_a = \frac{P_a}{\rho a \ln \frac{b}{a}} - \frac{\sigma_Y}{\rho a} - v_a^2 \left(\frac{1}{a} + \frac{a^2 - b^2}{2ab^2 \ln \frac{b}{a}} \right)$$
(19)

3-3-گامھای مدلسازی

به منظور دستیابی به سرعت انبساط لوله، ابتدا معادله (19) با شرط معادله (10) محاسبه میشود. معادله حالت مربوط به محصولات انفجاری در هر گام از حل با توجه به شعاع لحظهای استوانه در معادله دیفرانسیل مربوط به سرعت انبساط استوانه، بعنوان شرایط مرزی وارد میشود. استحکام دینامیکی سرعت انبساط استوانه، بعنوان شرایط مرزی وارد میشود. استحکام دینامیکی مماده و یا به عبارتی تنش سیلان دینامیکی با توجه به ارزیابی نرخ کرنش معادل در هر لحظه و جاگذاری در معادله (8)، استخراج میشود. این بدان معادل در هر لحظه و جاگذاری در معادله (8)، استخراج میشود. این بدان معادل در هر لحظه و جاگذاری در معادله (8)، استخراج میشود. این بدان مدنظر قرار می گیرد. در مدل سازی حاضر به منظور درنظر گرفتن نرخ کرنش و بارگذاری دینامیکی لازم است که تنش معادل را با تنش دینامیکی یکسان درنظر گرفت و همان گونه که ذکر شد باتوجه به تنییرشکل پلاستیک، مقدار تر را بالاتر از تنش تسلیم ماده لحاظ نمود[20]. یعنی طبق رابطه (20): $\sigma_{\text{Dynamic}} = \sigma_{\text{Static}} \left[1 + \left(\frac{z}{D} \right)^{1/q} \right] = \sigma_e > \sigma_Y$

مقادیر مربوط به ضرایب معادله (20) برای آلومینیوم آلیاژی 2024 در جدول 1 ارائه شده است [26].

نکتهای که در محاسبه فشار داخلی میبایست در نظر گرفته شود این است که مقدار فشار داخلی اعمال شده توسط ماده منفجره به دیواره استوانه، باتوجه به معادلات حالت محصولات انفجاری، تابعی از حجمها و به تبع آن مجذور شعاع استوانه و شعاع اولیه ماده منفجره است که میبایست در محاسبات در نظر گرفته شود.

فرآیند تا انبساط سیلندر به مقدار از پیش تعیینشده ادامه مییابد. مراحل انجام تحلیل در فلوچارت شکل 3 نشان داده شده است. مراحل تحلیل عددی با بکارگیری نرمافزار متلب صورت گرفته است.

3-4-انجام شبيهسازى

در گام بعدی، شبیهسازی نرمافزاری استوانه حاوی ماده منفجره با استفاده از نرمافزار اُتوداین² انجام شده است. شماتیک مدلسازی در حالت دوبعدی متقارن محوری مانند شکل 4 انجام شده است. با توجه به مفروضات مسئله، خرج انفجاری بصورت خطی و در راستای محور استوانه تعبیه شده است.



با درنظر گرفتن حجم ثابت المان در حین فرایند انبساط و حالت تراکم نایذیری ماده [13]، طبق روابط (9) و (10) داریم:

$$\Gamma = b^2 - a^2 = b_0^2 - a_0^2 \tag{9}$$

$$b = (b_0^2 - a_0^2 - a^2)^{\overline{2}}$$
(10)

که a و b اشاره به شعاع داخلی و خارجی استوانه و اندیس ٥ مربوط به حالت اولیه آن میباشد.

> با دیفرانسیل گیری از رابطه (10)، معادله (11) استخراج میشود: .

$$\dot{\Gamma} = 2b \frac{dv}{dt} - 2a \frac{du}{dt} = \mathbf{0}$$

$$bv_b = av_a = rv_r \tag{11}$$

$$\dot{v}_r = \frac{v_a}{r} + \frac{u}{r} \dot{v}_a - \frac{u}{r^3} v_a^2$$
(12)

از دیگر روابط که در ادامه کار استفاده می گردد، رابطه مرتبط با معیار تسلیم ترسکا میباشد که بصورت رابطه (13) مطرح است:

 $\frac{1}{2}\max\{|\sigma_{\theta} - \sigma_{z}|, |\sigma_{z} - \sigma_{r}|, |\sigma_{r} - \sigma_{\theta}|\} = \frac{1}{2}\sigma_{Y}$ (13)

این مدل برای بررسی تسلیم فلزات در حالت تنشهای مختلف کاربرد دارد و همواره تنش برشی درون ماده را مورد توجه قرار می دهد. اگر وضعیت تنش برشی درون ماده (که با σ نشان داده می شود) در درون مرزهای تسلیم آن باشد ($\sigma_e < \sigma_Y$) ماده تسلیم نشده و در غیر این صورت ($\sigma_e < \sigma_Y$)، ماده تسلیم خواهد شد [26] که حالت دوم در این تحقیق حاکم است. یعنی با فرض $\sigma_Y < \sigma_Y$ ماده به حالت تسلیم و شرایط تغییر شکل پلاستیک تبدیل می گردد. این مدل، اثرات کرنش اعمالی و یا نرمشدگی آن با تنش معادل σ_e و مقایسه می گردایی آرا در نظر نمی گیرد. البته با درنظر گرفتن تنش معادل σ_e و مقایسه آن با تنش سیلان موثر دینامیکی میتوان اثرات کرنش و یا نرخ کرنش اعمالی و یا نرخ کرنش اعمالی و یا نرم شدگی در شایع از با تنش معادل σ_e و مقایسه آن با تنش سیلان موثر دینامیکی میتوان اثرات کرنش و یا نرخ کرنش اعمالی و یا نرخ کرنش اعراد می می می در ا

با توجه به باز بودن دو انتهای استوانه، می توان شرایط تنش در استوانه را بصورت تنش صفحهای درنظر گرفت. یعنی تنش در راستای محور z صفر درنظر گرفته می شود (σ_z = **0**).

بنابراین معادله حرکت (2)، با درنظر گرفتن جمله شتاب (12) و شرایط تسلیم، بهصورت رابطه (15) تبدیل می گردد:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} = \frac{\sigma_Y}{r} + \rho \left(\frac{v_a^2}{r} + \frac{a}{r} \dot{v}_a - \frac{a^2}{r^3} v_a^2 \right)$$
(15)

با انتگرالگیری عبارت (15) و درنظرگرفتن شرایط مرزی $\sigma_r = -P_a$ در $\sigma_r = -P_a$ ، معادله تنش بدست میآید. طبق رابطه (16) داریم:

Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2025-04-21

²⁻ Autodyn

مهندسی مکانیک مدرس، خرداد 1394، دوره 15، شما*ر*ه 3

¹⁻ Thermal Softening

مش،بندی ماده منفجره و هوای پیرامونی باتوجه به تغییرشکلهای بسیار گسترده و بهمنظور جلوگیری از واپیچش المانها، بصورت اویلری و مش,بندی ماده تشکیلدهنده استوانه، لاگرانژی انتخاب شده است.

گیجهای متحرک در راستای ضخامت استوانه تعبیه شدهاند که میزان جابجایی و سرعت شعاعی را در مکانهای متفاوت اندازهگیری میکنند. آنالیز اندازه شبکه مشبندی در قسمت نتایج ارائه شده است.

خروجی روش تحلیلی و شبیهسازی انجام شده در خصوص استوانه آلومینیومی سری 2024 با شعاع داخلی و خارجی 12/70 و 18/70 میلیمتر حاوی ماده منفجره تی اِن تی¹ انجام شده است. انبساط سیلندر تا دستیابی شعاع خارجی به مقدار 30 میلیمتر در نظر گرفته شده است. سایر مفروضات در جدول 1 ارائه شده است.



شکل 4 شماتیک چیدمان آزمایش استوانه و مکان مربوط به نقاط دتونیشن به همراه نمودار مربوط به شرایط مرزی مورد استفاده در تحقیق

جدول 1 مشخصات سیلندر آلومینیومی 2024 مورد استفاده در تحلیل و							
شبیهسازی [26،23]							
مقدار	ی هندسی و فیزیکی سیلندر	مشخصهها					
12/70	شعاع داخلی (mm)						
18/70	شعاع خارجي (mm)	.1.4 .1.1					
30	شعاع نھایی انبساط (mm)	ابعاد و اندازه					
200	طول (mm)						
2780	چگالی (kg/m³)	e : 1 :					
897	گرمای ویژه (J/kgK)	حواص فيزيدي					
260	تنش تسليم (MPa)						
6400	D	مدل پلاستیسته					
0/25	q	کوپر -سایموند					
5328	سرعت صوت (m/s)						
1/338	شيب منحنى	معادله حالت					
2	ضريب گرونايزن						

1- TNT

4- ارائه نتايج

مقادیر مربوط به شعاع داخلی و خارجی و همچنین سرعت استوانه مربوط به تحلیل صورت گرفته بر مبنای مفروضات مطروحه در جدول 3 و بصورت گرافهایی در شکل های 5 تا 11، ارائه شده است. همچنین مراحل مختلف شبیهسازی فرآیند انبساط لوله در شکل 12 نشان داده شده است.

جدول 2 مشخصات ماده منفجره تی. اِن. تی و ضرایب مورد استفاده در معادله JWL [23]

مقدار	ثوابت ماده منفجره			
1630	چگالی (kg/m³)			
6930	سرعت دتونیشن D (m/s)			
21/0	فشار چاپمن-جوگت (GPa)			
6/0 e+ 6	انرژی ویژه بر واحد حجم (kJ/m³)			
4/15	<i>R</i> 1			
0/95	<i>R</i> 2			
0/3	ω			
373/77	(GPa) A			
3/7471	(GPa) B			
1/7	ثابت گاز γ			



شکل 5 نمودار فشار داخلی استوانه در حین فرآیند حاصل از روش تحلیلی



شکل 6 نمودار تغییرات سرعت شعاعی استوانه حاصل از روش تحلیلی و شبیهسازی

زمان (ميكروثانيه)								
ميانگين	12	10	8	6	4	2		
	25/86	23/38	20/85	18/32	15/84	13/70	تحليل	1.1.1.1.1
	26/38	23/77	21/22	18/72	16/26	13/98	شبيەسازى	شعاع داخلی (mm)
-2/05%	-2/01%	-1/66%	-1/77%	-2/18%	-2/65%	-2/04%	خطا	
	29/28	27/11	24/96	22/89	20/96	19/39	تحليل	
	29/78	27/50	25/29	23/28	21/37	19/73	شبيەسازى	شعاع خارجی (mm)
-1/63%	-1/67%	-1/4%	-1/32%	-1/7%	-1/95%	-1/75%	خطا	
	1231/12	1254/93	1268/52	1261/54	1191/17	867/17	تحليل	سرعت انبساط
	1285/55	1259/41	1231/31	1267/86	1167/67	1034/18	شبيەسازى	شعاع داخلى
-0/074%	-4/42%	-0/35%	2/93%	-0/5%	1/97%	-19/25%	خطا	(ms-1)

Pa

جدول 3 مقادیر مربوط به شعاع داخلی و خارجی و همچنین سرعت استوانه در تحلیل و شبیهسازی در حین فرآیند

DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.3.27.7]



شکل 11 گرادیان تغییرات تنش محیطی در طول ضخامت بر حسب زمان

در این مرحله لازم است استقلال شبیهسازی انجام شده از شبکه مورد بررسی قرار گیرد. این کار اصطلاحاً "مطالعه مش بندی¹" نامیده می شود که هدف عمده آن بررسی همگرایی جواب ها است. از آنجایی که در نرمافزار اتوداین شکل المان ها قابل انتخاب نیست، لذا مطالعات شبکه مش بندی محدود به شکل المان ها می گردد. مطالعات بدین تر تیب است که ابتدا مسئله را با المان های در شت (تعداد کم المان ها) تحلیل کرده و یکی از خروجی ها مانند سرعت انبساط شعای (بعنوان کلیدی ترین نتیجه) در نظر گرفته می شود. فرآیند انتخاب المان ها تا جایی صورت می گیرد که اختلاف بین نتایج کم و یا نمودار آن یکنواخت تر شود. نکته قابل توجه این است که با در شت بودن و یا ریز کردن المان ها امکان واگرایی جواب ها نیز وجود دارد.





شکل 9 نمودار تغییرات استحکام ماده باتوجه به معادله (6) حاصل از روش تحلیلی

¹⁻ Mesh Study



شکل 12 مراحل مختلف شبیهسازی فرآیند انبساط لوله (کانتور سرعت)

(MF=1mm × 1mm) ضریب مش بندی¹ بصورت اندازه یک مش برابر با درنظر گرفته میشود. شبیه سازی هایی با اندازه ضریب مش بندی مختلف در تمامی قطعات مدل شده انجام شد و در هریک سرعت انبساط شعاع داخلی بدست آمد. نمودار حاصل در شکل 13 نشان داده شده است.

همانگونه که از نمودارهای پایینی شکل 13 مشاهده میشود، منحنی ضریب مشبندی 25/0 دارای ناپایداری فراوان بوده و منحنی 5/0نسبت از سایر منحنیها فاصله داشته و جواب حاصله دارای همگرایی نیست. بررسی جواب منحنی با ضریب مشبندی نیز حاکی از آن است که این منحنی هم بصورت تکهای بوده و با توجه به زمان حل طولانی (حدود 2 ساعت)، اندازه حاصله برای المانها مطلوب نیست. مقایسه منحنیهای مربوط به ضریب مشبندی 1 و 2 این نتیجه را حاصل میدارد که منحنی دارای ضریب مش 2 دارای قلهها و درههای عمیق تر بوده و از اینرو انتخاب ضریب مشربندی 1، بهترین گزینه میباشد.

از آنجایی که سرعت انبساط در یک نقطه خاص و در یک زمان خاص به دلیل پراکندگی جوابها متفاوت است، لذا نمی توان از همگرایی نتایج در یک نقطه مشخص استفاده نمود. ولیکن باتوجه به نمودار بالایی شکل 12 می توان دریافت که نتایج در حالت کلی دارای همگرایی خوبی است و این از قابلیتها و مزایای نرمافزار اتوداین است که حساسیت جوابها نسبت به اندازه المانها اندک می باشد.

5- تحليل نتايج

زمان فرآيند انبساط استوانه تا رسيدن به استوپر و توقف آن، حدود 13



شکل 13 نمودارهای سرعت انبساط در ضریب مشربندی مختلف (شکل پایین، نمودار بزرگنمایی شده در زمان بین 9 تا 13 میکروثانیه و سرعت 1210 تا 1330 متربر ثانیه را نشان میدهد)

¹⁻ Mesh Factor

میکروثانیه میباشد (طبق شبیه سازی انجام شده زمان رسیدن موج شوک و شروع انبساط استوانه حدود 1/88 میکروثانیه پس از دتونیشن میباشد). طبق تحلیل های صورت گرفته فشار داخلی استوانه باتوجه به معادله حالت محصولات انفجاری و تغییرات حجم داخلی استوانه، حالت نزولی داشته و از مقدار اولیه 8/4 گیگاپاسکال در شعاع داخلی 12/7 میلی متر به 26/0 گیگاپاسکال در شعاع داخلی 26/72 میلی متر در زمان 12/7 میکروثانیه تنزل می یابد. این موضوع در شکل 4 نشان داده شده است.

نمودار سرعت شعاع داخلی استوانه بعنوان کلیدیترین نتیجه، در دو حالت حاصل از تئوری و شبیهسازی در شکل **6** نشان داده شده است.

همانگونه که از شکل 6 پیداست، هردو نمودار حاصل از تحلیل و شبیه سازی روند یکسانی دارند و هردو تا زمان حدود 12/7 میکرو ثانیه به یک مقدار حدی بنام سرعت گارنی [6] که مقدار آن حدود 1250 متربر ثانیه است، همگرا می شوند.

هرچند بر مبنای جدول 3 درصد خطای حاصل از تحلیل تئوری نسبت به شبیهسازی نرمافزاری درخصوص سرعت انبساط دارای خطای قابل قبول %074/0- است ولیکن عملکرد مربوط به سرعت بدست آمده از شبیهسازی دارای رفتار نوسانی است. این بدان دلیل است که موج شوک عبوری درون ماده پس از برخورد با قسمت خارجی استوانه به موج برگشتی تغییر می یابد که می تواند منجر به کاهش سرعت در مقطعی از زمان گردد. برعکس اگر موج عبوری در راستای حرکت انبساطی استوانه باشد منجر به افزایش سرعت می گردد. بنابراین می توان اظهار داشت که تأثیر موج شوک عبوری درون ماده، رفتار نوسانی آن را سبب می شود.

تغییرات شعاع خارجی و داخلی در هر دو حالت حل تحلیلی و شبیه سازی در شکل 7 نشان داده شده است. از این نمودارها معلوم می گردد که رفتار انبساطی شعاع خارجی و داخلی در هردو حالت شبیه سازی و تحلیل تئوری بر یکدیگر منطبق می باشد. همانگونه که از جدول 3 ملاحظه می گردد، درصد خطای مقادیر شعاع داخلی و خارجی در تحلیل با مقدار حاصل آن از شبیه سازی به ترتیب %20/5 و %16/1 اختلاف دارد که قابل قبول می باشد و می توان اظهار داشت که در بر آورد مقادیر جابجایی شعاعی، روابط تحلیلی تطابق خوبی را با شبیه سازی نشان می دهد.

نکته دیگری که میتوان از شکل دریافت این است که اختلاف شعاع داخلی و خارجی در طول فرآیند کاهش مییابد به عبارتی دیگر ضخامت استوانه کاهش مییابد و این با فرضیات درنظر گرفته شده قبلی مبنی بر ثابت بودن حجم ماده، تطابق و سازگاری دارد.

باتوجه به ماهیت مسئله، این نکته را میتوان دریافت که نرخ کرنش در حین فرآیند ثابت نیست و تابعی از سرعت و شعاع لحظهای استوانه میباشد [22،21]. نمودار تغییرات تحلیلی نرخ کرنش در شکل 8 نشان داده شده است. از نمودار این شکل برمیآید که نرخ کرنش به حدود 1/s دست مییابد و این امر در فرآیندهای انفجاری دور از ذهن نیست. نرخ کرنش در لحظات ابتدایی فرآیند باتوجه به افزایش سریع سرعت، به حداکثر مقدار خود میرسد و پس از آن باتوجه به یکنواختی سرعت و افزایش شعاع استوانه، به مقدار حدود 1/s 45700 کاهش مییابد.

می توان با توجه به رابطه (8) و درنظر گرفتن مقدار تغییرات نرخ کرنش، مقدار استحکام دینامیکی و یا تنش سیلان را درون جسم و در حین فرآیند ارزیابی نمود. همانگونه که پیداست، نرخ کرنش اثر مستقیمی بر استحکام دینامیکی ماده دارد و از همین رو تغییرات تنش سیلان دینامیکی در راستای

تغییرات نرخ کرنش است. این ارتباط موجب می گردد که استحکام دینامیک ماده در حین فرآیند روند افزایشی داشته باشد که به این پدیده اثرات نرخ کرنش سختی¹ گفته می شود. مقدار اولیه استحکام ماده که همان استحکام استاتیکی است برابر با 260 مگاپاسکال می باشد که به مقدار 759 مگاپاسکال یعنی 2/91 برابر می رسد [26]. این اثر در شکل 9 نشان داده شده است.

تنش شعاعی و محیطی طبق معادلات (16) و (17) محاسبه می گردد. طبق رابطه (14)، اختلاف مقادیر تنش شعاعی و محیطی برابر σ_0 است و در نتیجه روند هردو نمودار یکسان است که باتوجه به متغیر بودن استحکام تسلیم، مقادیر آنها تغییر می نماید. لازم به توضیح است که تنش شعاعی در سطح داخلی، مقداری برابر فشار محصولات گازی دارد و در سطح خارجی باتوجه به عدم وجود فشار، مقدار آن برابر صفر است که این موضوع در سرتاسر فرآیند صادق است. نمودارهای تنش شعاعی و محیطی به ترتیب در شکل 10 و شکل 11 نشان داده شده است. نتایج حاصل از شبیه سازی در شکل 21 نشان داده شده است. همانگونه که پیشتر نیز ذکر شده بود، کل زمان فرآیند شبیه سازی /144 میکروثانیه می باشد که لازم است زمان رسیدن موج شوک و اعمال فشار که 18% میکروثانیه است، در محاسبات عددی مدنظر قرار گیرد که این کار در مدل سازی لحاظ شده است.

6- نتیجه گیری

براساس اهداف از پیش تعیین شده و موارد مطروحه و همچنین نتایج حاصله، موارد زیر نتیجه میشود:

• در این تحلیل، معادلات تعادل استوانه ارائه و پس از درنظر گرفتن شرایط مرزی، معادله دیفرانسیلی سرعت انبساط شعاعی استخراج میشود. با وارد کردن شرایط مرزی و حل معادله میتوان سرعت انبساط را در هرلحظه یافت. اصلاح استحکام دینامیکی ماده و فشار محصولات انفجار منجر به تغییر سرعت انبساط در هر مرحله از تحلیل میگردد. باتوجه به نتایج تحلیل صورت گرفته در مقایسه با شبیه سازی، میتوان گفت که تکنیک بکار گرفته شده در این تحلیل منحصر به فرد و جامع میباشد و میتوان از مدل ارائه شده در حالت واقعی و در "آزمایش سیلندر²" بهره برد که این امر میتواند منجر به کاهش هزینه ها و اتلاف زمان گردد.

•اصولاً انتخاب نوع معادله حالت و مدل مادی تأثیری در تکنیک تحلیل صورت گرفته ندارد و لازم است به گونهای انتخاب گردد تا بر شرایط و نتایج واقعی منطبق باشد. لیکن از همگرایی نتایج تحلیلی و شبیهسازی صورت گرفته میتوان استنباط کرد که معادله حالت UWL بههمراه ضرایب مربوطه به خوبی رفتار انبساطی محصولات انفجاری را توصیف میکند. همچنین هرچند اساس مدل مادی کوپر-سایموند تجربی و آزمایشگاهی میباشد، ولیکن تطابق خوبی را در تحلیل در مقایسه با شبیهسازی نشان میدهد که به راحتی میتوان آنها را در محاسبات بکار برد.

 به دلیل وجود ماهیت موج رفت و برگشتی از جدارههای استوانه، انبساط آن رفتار نوسانی داشته که در شبیهسازی نرمافزاری مشهود است. لیکن، روند کلی سرعت شعاعی در هردو حالت تحلیل و شبیهسازی مشابه و یکسان میباشد و به سرعت گارنی نیل مییابد.

باتوجه به اینکه سایر پارامترهای قابل استخراج ازجمله تنشهای شعاعی
 و محیطی وابسته به سرعت شعاعی هستند، لذا سرعت شعاعی در تحلیل
 صورت گرفته با توجه به شبیهسازی انجام شده مورد تصدیق است و درنتیجه

¹⁻ Strain Rate Hardening Effect

²⁻ Cylinder Test

- [4] J. Pearson, A Fragmentation Model for Cylindrical Warheads, Naval Weapons Center, 1990.
- [5] S. E. Gardner, Analysis of Fragmentation and Resulting Shrapnel Penetration of Naturally Fragmenting Cylindrical Bombs, *Lawrence Livermore National Laboratory*, U.S. Department of Energy, 2000.
- [6] M. Goto, R. C. Becker, T. J. Orzechowski, H. K. Springer, A. J. Sunwoo, C. K. Syn, Explosively driven facture and fragmentation of metal cylinders and rings, *Hypervelocity Impact Symposium*, Williamsburg, VA, United States, 2007.
- [7] Q. B. Diep, J. F. Moxnes, G. Nevstad, Fragmentation of projectiles and steel rings using nuerical 3d simulation, 21th international symposium of ballistics, Adelaide, Australia, 2004.
- [8] J. E. Reaugh P. C. Souers, A Constant-Density Gurney Approach to the Cylinder Test, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, Vol. 29, No. 2, pp. 124-128, 2004.
- [9] E. Lee, Y. Lee, Autofrettage process analysis of a compound cylinder based on the elastic-perfectly plastic and strain hardening stress-strain curve, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol 23, pp. 3153-3160, 2009.
- [10] C. R. Hoggatt, R. F. Recht, Stress-Strain Data Obtained at High Rates Using an Expanding Ring, *Experimental Mechanics*, Vol. 40, pp. 441-448, 1969.
- [11] N. Perrone, On the Use of the Ring Test for Determining Rate-sensitive Material Constants, *Experimental Mechanics*, Vol. 28, pp. 232-236,1968.
 [12] D. C. Tucker, W. R. Orr, C. R. Hoggatf, Prediction of the theoretical
- [12] D. C. Lucker, W. R. Orr, C. R. Hoggatt, Prediction of the theoretical behavior and energy transfer when solids are subjected to explosive loading, *University of denver denver research institute*, Six Month Summary Report, DA-Z8-017-AMC-1400(A), 1965.
- [13] S. T. S. Al-Hassani, W. Johnson, The dynamics of the fragmentation process for spherical shells containing explosives, *Int. J. mech.* 8ei. Pergamon Press., Vol. 11, pp. 811-823, 1969.
- [14] D. Tan, C. Sun, Y. Wang, Acceleration and Viscoplastic Deformation of Spherical and Cylindrical Casings under Explosive Loading, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, Vol. 28, No. 1, pp. 43-47, 2003.
- [15] L. Yong, W. L. Xin, X. L. Wei, Z. F. Meng, Residual stress analysis of a thick-walled cylinder in dynamic loading, *Int. J. Pres. Ves. & Piping*, Vol. 60, pp. 17-20, 1994.
- [16] E. J. Appleby, The Dynamic Viscoplastic Expansion Of A Cylindrical Tube, *Illinois Institute Of Technology Department Of Mechanics*, Domiit Rep. No. 1-Z.4, Contract No. Nonr 140604, 1963.
- [17] S. Y. Leu, Analytical and numerical investigation of strain-hardening viscoplastic thick-walled cylinders under internal pressure by using sequential limit analysis, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* Vol. 196, pp. 2713–2722, 2007.
- [18] G. X. lin, An Exact Elasto-Plastic Solution for an Open-Ended Thick-Walled Cylinder of a Strain-Hardening Material, Int. J. Pres. Ves. & Piping, Vol. 52, pp. 129-144, 1992.
- [19] A. C. Yiannopoulos, A simplified solution for stresses in Thick-wall cylinders for various Loading conditions, *Computers & Strucrures*, Vol. 60, No. 4, pp. 571-578, 1996.
- [20] D. Durban, M. Baruch, Analysis Of An Elasto-Plastic Thick Walled Sphere Loaded By Internal And External Pressure, Int. J. Non-Linear Mechanics, Vol. 12, pp. 9-12, 1977.
- [21] L. M. lin, F. M. fu, Limit analysis of viscoplastic thick-walled cylinder and spherical shell under internal pressure using a strain gradient plasticity theory, *Appl. Math. Mech. Eng.*, Vol. 12, No. 29, pp. 1553–1559, 2008.
 [22] S. Y. Leu, Convergence analysis and validation of sequential limit
- [22] S. Y. Leu, Convergence analysis and validation of sequential limit analysis of plane-strain problems of the von Mises model with nonlinear isotropic hardening, *International Journal For Numerical Methods In Engineering*, Vol. 64, pp. 322-334, 2005.
- [23] P. T. Houston, D. Zoetermeer, Theory Manual, *Century dynamic Inc.*, Rev. 4.3, 2005, www.century-dynamics.com.
- [24] M. A. Meyers, Dynamic behavior of materials, John Wiley & Sons, Canada, 1994.
- [25] G. R. Cowper, P S Symonds, Strain-hardening and strain-rate effects in the impact loading of cantilever beams, *Providence, R.I. : Division of Applied Mathematics*, Brown University, Technical report C11, no. 28, 1957.
- [26] N. Jones, Structural Impact, Cambridge University Press, United Kingdom, 1989.

سایر متغیرهای قابل استخراج و وابسته به سرعت شعاعی، از صحت کافی برخوردار میباشند.

• باتوجه به ماهیت وجود اثر نرخ کرنش سختی در فرآیندهای انفجاری، این پدیده به خوبی در تحلیل صورت گرفته بکار گرفته شده و استحکام دینامیکی ماده که حدود 3 برابر مقدار استحکام استاتیکی میباشد، در رفتار انبساطی استوانه کاملاً مشهود است. بنابراین در تحلیل فرآیند با نرخ کرنش بالا می بایست همواره استحکام دینامیکی ماده نسبت به حالت استاتیکی آن مدنظر قرار داشته باشد.

7- فهرست علائم

- (m) شعاع داخلی (a
- **b** شعاع خارجي (m)
- *c* شعاع استوپر (m)
- (N) نيروى محورى F_{t}
- (N) نیروی شعاعی (N)
- r مختصات استوانهای (m)
 - (s) زمان t
 - ۷ حجم بدون بعد
- (ms⁻¹) سرعت انبساط شعاعی v_r
- (ms⁻¹) شتاب انبساط شعاعی \dot{v}_r

علائم يونانى

ر چگالی (kgm⁻³)

- (Nm⁻³) تنش برشی معادل درون ماده σ_e
 - (Nm⁻³) تنش محیطی $\sigma_{ heta}$
 - (Nm⁻³) تنش شعاعی σ_r
 - (Nm⁻³) تنش تسليم σ_{Y}
 - (Nm⁻³) استحکام دینامیکی σ_{Yd}
 - تنش محوری (Nm⁻³) تنش محوری σ_z
 - بالانويسها

JWL معادله حالت ماده منفجره و محصولات انفجاري

MF ضریب مش بندی

8- فهرست مراجع

- [1] E. Paffumi, N. Taylor, Structural Response of a Large Pressure Vessel to Dynamic Loading, *JRC sientific and technical reports*, Luxembourg, 2008.
- [2] C. L. Aseltine, Analytical predictions of the effect of warhead asymmetries on shaped charge jets, DTIC, 1980.
- [3] W. Walters, Introduction to Shaped Charges, Army Research Laboratory, USA, 2007.

DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.3.27.7