# شبیه سازی دینامیکی سقوط آزاد مواد ویسکوالاستیک با استفاده از روش المان محدود (کد مقاله۱۲۶)

موسی بابایی نصیر[۱] ، علی عادل خانی[۲]

**چکیده**

شبیه سازی پدیده ضربه در میوجات و محصولات کشاورزی میتواند ازشدت صدمات وارده در سقوط آزاد آنها بکاهد. از انجا که مواد و محصولات کشاورزی رفتاری مثل مایع-مثل جامد از خود بروز می دهند، مواد انتخاب شده برای مدل سازی آنها مواد ویسکوالاستیک می باشد. در این مطالعه با استفاده از نرم افزار قدرتمند ANSYS LS-DYNA یک مدل سه بعدی از یک جسم ویسکوالاستیک و ویژگی چند ماده ای بودن محصولات کشاورزی در سقوط آزاد انها با ارتفاع سقوط یک متر مدل سازی و تحلیل شده است. نمودار تنش و کرنش به دست آمده از نتایج نشان دهنده آنست که حداکثر تنش و کرنش در ضربه اولیه، که شدت ضربه اولیه نیز بستگی به ارتفاع سقوط آن دارد، ایجاد می شود.

**کلید واژه:** محصولات کشاورزی، المان محدود، ویسکوالاستیک خطی، سقوط آزاد

[۱]- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک ماشینهای کشاورزی دانشگاه ارومیه، پست الکترونیک: mosababaei@yahoo.com
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک ماشینهای کشاورزی دانشگاه تهران

## ۱- مقدمه

میوه ها وسبزیجات اغلب به طور مکانیکی توسط بارهای ضربه ای دچار آسیب می شوند. پدیده ضربه به طور متناوب در زمان انتقال ،جابه جایی ،و فرآوری مواد کشاورزی اتفاق می افتد. ضربات بزرگ در مواد ومحصولات کشاورزی در زمان سقوط آزاد آنها در زمان برداشت مکانیزه پیش می آید، شبیه سازی این مهم در میوجات و محصولات کشاورزی میتواند ازشدت صدمات وارده در سقوط آزاد بکاهد. مواد کشاورزی اغلب اجسام پیچیده ای می باشندبه گونه ای که در اجسام بیولوژیکی الاستیسیته با توجه به سن وموقعیت فیز یولوژیکی تغییر می کند. براساس مطالعات انجام شده توسط هامان[1] در سال ۱۹۶۹ و محسنین[2] در سال ۱۹۷۰ مشخص شده است که مواد ومحصولات کشاورزی از خود رفتاری به مانند مواد ویسکوالاستیک خطی نشان می دهند[3]. مواد ویکوالاستیک خصوصیات ترکیبی مثل – مایع ومثل- جامد را دارا می باشند. در یک ماده ویسکو الاستیک خطی نسبت تنش به کرنش تنها تابع زمان بوده و تابع مقدار نیرو نمی باشد.از انجا که بیشترین سقوط آزاد محصولات بر روی یک سطح مسطح اتفاق می افتد، در این مطالعه به تحلیل تنش های وارده به مواد ویسکوالاستیک در سقوط آزاد آنها بر روی یک سطح مسطح می پردازد. در این بررسی نتایج ناشی از سقوط آزاد مواد ومحصولات کشاورزی مشخص می گردد. تحلیل با استفاده از روش المان محدودصورت گرفته است. قابل ذکر است که تئوری اساسی برای استفاده از مدل سازی کامپیوتری عددی قبلا توسط هرمن و پترسون[3] در سال ۱۹۶۸ ارائه شده است[4,2]. بررسی های با استفاده از المان محدود برا ی تعیین برخی پارامترهای مواد ومحصولات کشاورزی انجام شده است. شایان ذکر است که کار ها ومطالعات صورت گرفته قبلی به صورت فرضیاتی به صورت دو بعدی ارئه شده اند که ممکن نتایج به دست امده از دقت کافی بر خوردار نباشند .اما در این مطالعه با استفاده از نرم افزار قدرتمند ANSYS LS-DYNA یک مدل سه بعدی از یک جسم ویسکوالاستیک و ویژگی چند ماده ای بودن محصولات کشاورزی مدل سازی و تحلیل شده است. گفتنی است روشی که در مسائل حل توسط LS-DYNA به کار می رود، حل بسیار سریع در زمان کوتاه با تغییر شکلهای دینامیکی بزرگ، مسائل شبه استاتیک و غیر خطی ، مسائل ضربه وتماس پیچیده است. در این نرم افزارتدابیری برای آزمون سقوط آزاد اجسام در نظر گرفته شده است.

## ۲- مواد و روشها

### ۲-۱- ضربه اجسام ویسکوالاستیک

آزمایشات انجام شده با مواد ویسکوالاستیک در بسیاری از موارد در زمان ضربه مشابه با مدل ماکسول عمل می نماید.برای تعیین خصوصیات مکانیکی هر ماده، دانستن مدول الاستیسیته $E$، ویسکوزیته $\eta$ وزمان باز گشت $T$ ضروری است که می توانند با استفاده از ازمایشات مربوطه به دست ایند.

برای ضربه اجسام ویسکوالاستیک نسبت به یک جسم سخت روابط تقریبی برای زمانی که همه مواد کروی یا استوانه ای می باشند، یا زمانی که یکی از آنها سطح صاف می باشد، می تواند به دست آید.

ماکزیمم نیروی ایجاد شده در زمان ضربه ممکن است از رابطه زیر به دست آید:

$$P_{\max} = 1.576K(mv_0^2/K)^{\frac{3}{5}}[1+0.09(1/T)(m/K)^{\frac{2}{5}}v_0^{\frac{-1}{5}}]^{\frac{3}{5}} \qquad (۱)$$

و زمان مورد نیاز حداکثر تغییر شکل از رابطه زیر به دست می آید:

$$t_{\max} = 1.576(m/K)^{2/5}v_0^{\frac{-1}{5}}[1+0.09(1/T)(m/K)^{2/5}v_0^{-1/5}]^{2/5} \qquad (۲)$$

که در آنها $m$ جرم جسم محرک ، $v_0$ سرعت ضربه ،و $T$ زمان رلکسشن تنش و $K$ از رابطه زیر به دست می آید:

$$K = (4\pi/3)[E_1/(1-\upsilon^2)]q/\sqrt{(R_1+R_2)/R_1R_2} \qquad (۳)$$

---

[1] - Human
[2] - Mohsenin
[3] - Herman and Petrson

عبارت $q$ نشان داده شده در این رابطه یک ثابت می باشد که مقدار ان برای کره و جسم مسطح $0.318$ می باشد.در مورد جسم مسطح شعاع بینهایت می باشد که در نتیجه $K$ از رابطه زیر به دست می آید:

$$K = 1.33([E_1/(1-\upsilon^2)]\sqrt{R} \quad (۴)$$

که $R$ شعاع جسم کروی می باشد.

قابل ذکر است که به علت پیچیدگی مواد ویسکوالاستیک مهمترین راه حل مسئله ضربه ویسکو الاستیک استفاده از روش المان محدود می باشد.

## ۲-۲- المان محدود در ویسکوالاستیک خطی

روش المان محدود قابل کاربرد برای تحلیل تنش مواد ویسکوالاستیک می باشد.در به کارگیری روش فرض می شودکه مواد به صورت ویسکوالاستیک خطی می باشند.ترکیب تانسور تنش وکرنش با به کارگیری اساس موقعیت مکانی گره ها محاسبه می شود. به صورت معمول خواهیم داشت:

$$\sigma_{ij} = \delta_{ij}\sigma_v + S_{ij} \quad (۶)$$

که $\delta_{ij}$ دلتا کراناکربوده که به صورت زیر تعریف می شود:

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{If } i=j \\ 0 & \text{If } i\neq j \end{cases} \quad (۷)$$

و $\sigma_v$ متوسط تنش عمودی می باشد، که مقدار آن برابر است با :

$$\sigma_v = (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})/3 \quad (۸)$$

مقادیر $S_{ij}$ (تنش دیویتررویک) با جایگزاری مقدار $\sigma_v$ از مقادیر موجود در $\sigma_{ij}$ به دست می آید.

تانسور کرنش ممکن است به طور مشابه به دست آید:

$$\varepsilon_{ij} = \delta_{ij}\varepsilon_v + e_{ij} \quad (۹)$$

که:

$$\varepsilon_v = (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33})/3 = \varepsilon_{KK}/3 \quad (۱۰)$$

در مورد فشار هیدرو استاتیکی ارتباط برای تنش-کرنش عبارتست از:

$$\sigma = 3K\varepsilon_v \quad (۱۱)$$

که $K$ مدول حجمی الاستیسیته می باشد. اما ارتباط تنش وکرنش در ویسکوالاستیک عبارتست از:

$$\sigma_{ij} = \delta_{ij}\int_0^t \varphi_1(t-\tau)(\partial\varepsilon_{KK}/\partial\tau)d\tau + 2\int_0^t \varphi_2(t-\tau)(\partial e_{ij}/\partial\tau)d\tau \quad )$$

(۱۲

که $\tau$ زمان سپری شد ه ،t زمان حال می باشند. $\phi_1$ و $\varphi_2$ توابع رلکسشن برش می باشند که از روابط زیر به دست می آیند:

$$\varphi(t) = a_0 + \sum_{i=1}^{m} a_i e^{-\beta_i t} = a_0 + \varphi^*(t) \quad (۱۳)$$

تنش دیوتریک ممکن است به صورت زیر نوشته شود:

$$S_{ijN} = 2a_0 e_{ijN} + 2\int_0^{t_N-1} \varphi^*(t-\tau)(\partial e_{ij}/\partial\tau)d\tau + \int_{t_N-1}^{t_N} \varphi^*(t-\tau)(\partial e_{ij}/\partial\tau)d\tau \quad (۱۴)$$

توابع رلکسشن $\varphi(t)$ اغلب به طور متناوب توسط آزمون فشار غیر محوری نمونه های استوانه ای به دست می آید. در این موارد تنش $\sigma_{yy}$ صفر می باشدو تنش های $\sigma_{xx}$ ممکن است با استفاده از روابط روابط زیر تعیین شود:

$$\sigma_{xx}(t) = 2\int_0^t \varphi_2(t-\tau)(\partial\varepsilon_{xx}/\partial\tau - \partial\varepsilon_{yy}/\partial\tau)d\tau + 2[\varepsilon_{xx}(0) - \varepsilon_{yy}(0)]\varphi_2(t) \quad (۱۵)$$

با فرض مدول حجمی برای مدول الاستیک ،ممکن است رابطه تنش به صورت زیر نوشته شود:

$$\sigma(t) = K\varepsilon_{KK}(t) \quad (۱۶)$$

و در مورد فشار غیر محوری این رابطه به صورت زیر در می آید:

$$\sigma_{xx}(t) = 3K[2\varepsilon_{yy}(t) + \varepsilon_{xx}(t)] \quad (۱۷)$$

با حل رابطه بالا برای $\varepsilon_{yy}$ و با جایگزاری در رابطه قبلی $\sigma_{xx}$ خواهیم داشت:

$$\sigma_{xx}(t) = 3\int_0^t \varphi_2(t-\tau)(\partial\varepsilon_{xx}/\partial\tau)d\tau - (1/3K)\int_0^t \varphi_2(t-\tau)(\partial\sigma_{xx}/\partial\tau)d\tau + 3\varepsilon_{xx}(0)\varphi_2(t) - (1/3K)\sigma_{xx}(0)\varphi_2(t)$$

در زمان بررسی وتحقیق $\varepsilon_{xx}$ به عنوان مقدار ورودی و $\sigma_{xx}(t)$ به عنوان مقدارخروجی شناخته می شود.مدول الاستیسیته حجمی توسط آزمون های ویژه ای تعیین می شوندو کرنش $\varepsilon_{xx}$ با تابع اولیه زیر تعیین می شود،یعنی:

$$\varepsilon_{xx} = \varepsilon_0 H(t) \quad (۱۹)$$

که H(t) تابع گام های فشرده شده می باشد. استفاده از سه رابطه نمایی در بیشتر موارد برای داشتن دقت لازم کافی است.که نرم افزار به طورخودکار محاسبات را تنها با دادن نوع المان، شتاب جاذبه ،ارتفاع سقوط ،نوع ماده مورد استفاده که در اینجا باید از ویسکوالاستیک خطی استفاده کرد و دیگر پارامترها مانند ضریب استاتیکی و دینامیکی سطح و.. انجام داده ونتایج مورد نظر را به صورت گراف و کانتور های تنش وکرنش و.. به ما عرضه می کند.

## ۳-۲- تحلیل با نرم افزار

### ۱-۳-۲- المان مورد استفاده

المان مورد استفاده درقسمت داخلی محصولات کشاورزی در ANSYS LS-DYNA المان جامد ۱۶۴ می باشد،که از این المان برای تحلیل اجسام سه بعدی در ANSYS LS-DYNA استفاده می شود.این المان با استفاده از ۸ گره که دارای درجات آزادی به صورت انتقالی،سرعت وشتاب در هر گره در سه جهت x,y,z می باشدایجاد شده است.این المان تنها برای تحلیل دینامیکی در ANSYS LS-DYNA. استفاده می شود. خروجی نرم افزار از این المان تنش های اصلی، تنش ها ، تنش های فون مایزز و کرنش های متناظر با آن و.. می باشد. از المان shell 163 می توان برای شبیه سازی پوسته محصولات کشاورزی استفاده نمود. این المان دارای ۴ گره می باشد، که هردونوع بارگزاری در سطح وعمود بر سطح می تواند بر آن اعمال گ دد.این المان دارای ۱۲ درجه آزادی به صورت انتقالی ، سرعت و شتاب در جهات x,y,z و چرخش گره ها در محور های x,y,z می باشد. این المان تنها برای تحلیل های دینامیکی در ANSYS LS-DYNA. استفاده می شود. خروجی نرم افزار از این المان تنش هااصلی، تنش ها ، تنش های فون مایزز و کرنش های متناظر با آن و.. می باشد[1].

### ۲-۳-۲- مواد به کار گرفته شده

چون المان مورد استفاده در قسمت داخلی محصولات توانایی پشتانی کردن موادی چون ویسکوالاستیک را دارد پس برای قسمت داخلی محصولات از ویسکوالاستیک استفاده شد است، در نرم افزار ANSYS LS-DYNA فرمول مورد استفاده برای تعیین تابع رلکسشن تنش برای مواد ویسکوالاستیک به صورت زیر توسط پترسون در سال ۱۹۷۰ عرضه شده است:

$$\varphi(t) = G_\infty + (G_0 - G_\infty)e^{-\beta t} \quad (۲۰)$$

که: $\beta$ یک ثابت مربوط به ماده استفاده شده، $G_\infty$ مدول برشی نهایی، $G_0$ مدول برشی اولیه ،t زمان ضربه می باشد.
و از آنجا که در مدل برای داشتن رفتار الاستیک حجمی باید فشار از حجم به دست آید خواهیم داشت: p=K ln V . برای نرم افزار باید $G_\infty$ و $G_0$ و $\beta$ و K به عنوان ورودی به نرم افزار داده شود، قابل ذکر است که برای مورد سقوط آزاد با ید چگالی و ضریب الاستیسیته مواد نیز تعین شود.
اما از انجا که المان مورد استفاده برای پوسته محصولات یعنی shell 163 توانایی پشنیبانی از مواد ویسکوالاستیک را ندارد ،بنابراین از ماده الاستیک ایزوتروپیک برای این منظور استفاده می شود.که خواص ماده استفاده شده در جدول ۱ نوشته شده است[1].

### ۳-۲-۲- مدل سازی و مش بندی در ANSYS LS-DYNA

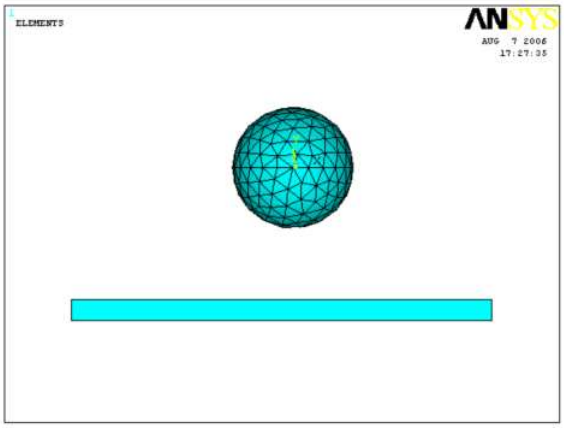
پس از کشیدن یک کره به شعاع ۴ سانتی متر در نرم افزار ،به مش بندی مدل پرداخته شد. بدین صورت که برای مش بندی قسمت داخلی کره از المان solid 164 و با خواص داده شده برای قسمت داخلی ماده استفاده شداست .اما برای مش بندی سطح کره از المان shell 163 و خواص مکانیکی داده شده برای قسمت پوستی ماده در جدول به کار گرفته شده است. سعی شده است چگالی مش بندی المان با توجه به قدرت کامپیوتر مورد استفاده انتخاب شود .که ج ما ۲۴۴۳ المان و ۵۱۴ گره پس از مش بندی ایجاد شد.در ضمن یک سطح فولادی با ضخامت 2mm برای جسم طلب در نظر رفته شد. شکل کره مش بندی شده در شکل ۱ مشاده می شود.

### ۴-۳-۲- پارامترهای مربوط به سقوط آزاد

پس از مش بندی مدل پارامترهای مربوط به سقوط مانند ارتفاع سقوط، شتاب جاذبه، موقعیت سطح برخورد پس از سقوط تعیین شده است. شبیه سازی کره برای ارتفاع سقوط یک متر انجام شده و شتاب جاذبه $9.81\ m/s^2$ و سرعت اولیه صفر و سطح برخورد به صورت صاف در نظر گرفته شده است. در ضمن برای سادگی ضریب های اصطکاک استاتیکی ودینامیکی در نظر گرفته نشده است. از انجا که برا ی کامپیوتر در نظر گرفتن ارتفاع یک متر بسیار سنگین و وقت گیر دیده شدلذا برای محاسبه تنها ارتفاع 50mm در نظر گرفته شد البته بادادن یک سرعت اولیه به کره که میتوان سرعت اولیه را از رابطه $\sqrt{2 \cdot g \cdot y}$ به دست آورد.

جدول ۱: خصوصیات ماده تحلیل شده

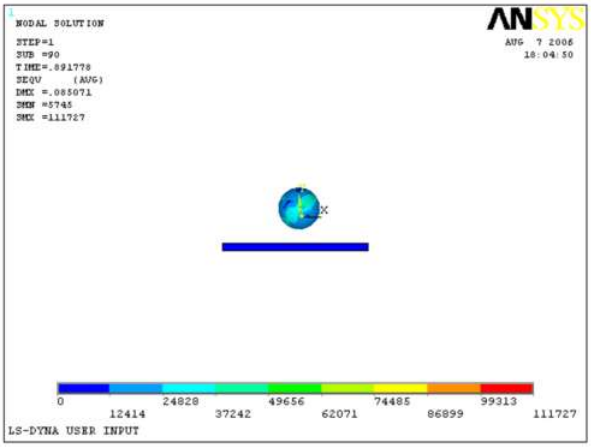
| | |
|---|---|
| خواص مکانیکی قسمت داخلی ماده | Dens:1500 $Kg/m^3$<br>$G_0 = 5e9Pa$<br>$G_\infty = 3e9Pa$<br>$\beta = .54$<br>$K = 20e9Pa$<br>$E = 10e9Pa$<br>$\upsilon = .45$ |
| خواص مکانیکی قسمت پوستی ماده | Dens=1200$Kg/m^3$<br>$E = 2e9Pa$<br>$\upsilon = .4$ |




شکل۱: کره مش بندی شده در نرم افزار ANSYS LS-DYNA

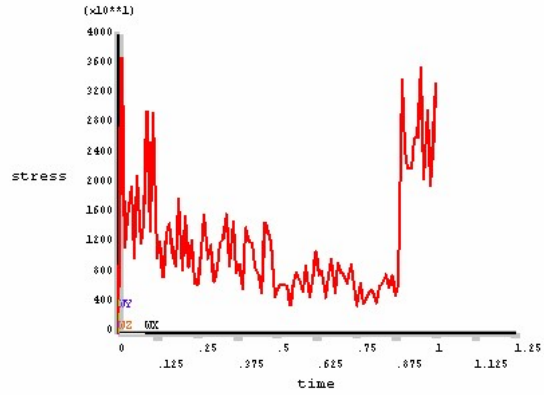
## ۳- نتایج وبحث

کانتور تنش بدست امده از تحلیل را می توان در شکل ۲ مشاهده نمود. آنچه باید مورد توجه قرار گیرد این است که کانتورهای تنش وکرنش برای یگ گره و المان دارای بیشترین مقدار می باشد. که در این تحلیل حداکثر تنش وکرنش بدست امده برای گره ۸۷ که دقیقا اولین گره کره است که با سطح صلب تماس پیدا می کند می باشد. نتایج بدست امده است نشان دهنده آنست که ماکزیمم آسیب ایجاد شده در نقطه تماس اولیه مواد ومحصولات کشاورزی با سطح صلب می باشد ، که علت ان را می توان شتاب ماکزیمم ایجاد شده در سقوط آزاد ماده دانست. در ضمن حداکثر تنش وکرنش ایجاد شده در لحظه اولیه تماس ایجاد می شود.

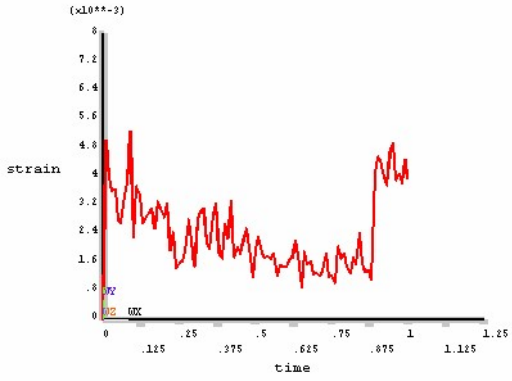



شکل ۲: کانتور تنش فون مایزز در گره ۸۷

نمودارهای نشان داده شده در شکل های ۳و۴ نشان دهنده تغییرات تنش وکرنش ایجاد شده در گره ۸۷ را در زمان یک ثانیه اولیه ضربه را نشان می دهد، همانطور که از این اشکال دیده می شود ماکزیمم تنش وکرنش ایجاد شده در تماس اولیه وضربه اولیه بین کره وسطح صلب ایجاد می شود ، و پس از ضربه اولیه مقار این تنش وکرنش در گره ۸۷ کاهش می یابد تا به یک مقدار مشخص می رسد، در واقع قسمت باقیمانده کرنش ایجاد شده نشان دهنده کرنش پلاستیک می باشد. در ضمن نمودار تنش- کرنش برای این گره در

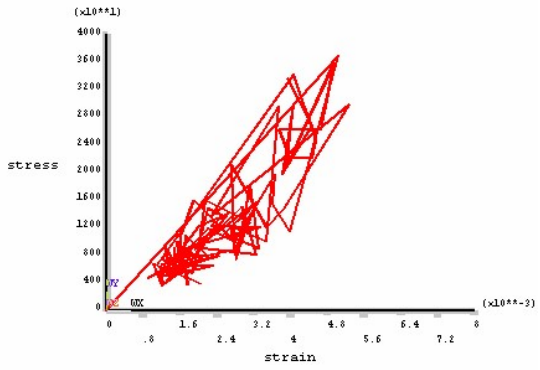



شکل ۳: نمودار تنش – زمان برای گره ۸۷ در مدت یک ثانیه

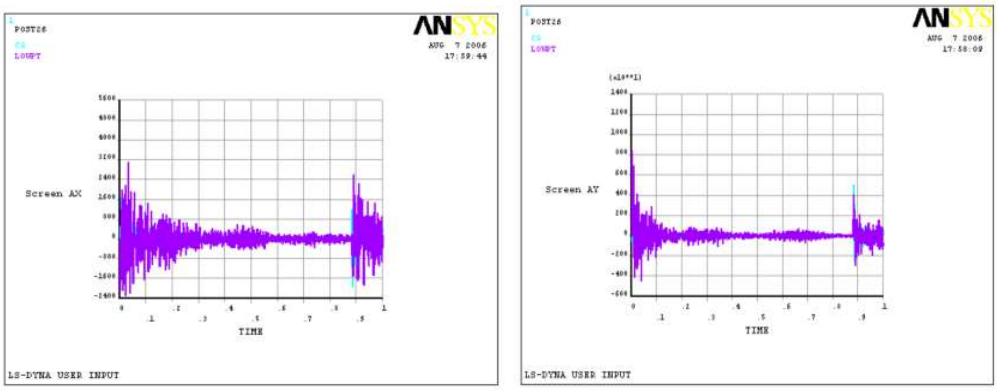



شکل ۴: نمودار کرنش – زمان برای گره ۸۷ در مدت یک ثانیه

شکل ۵ مشاهده می شود. همانطور که از این شکل نیز مشاهده می گردد جسم ، پس از داشتن یک رابطه الاستیک و سیل صعودی تنش مقدار یکباره کاهش می یابد و وارد منطقه پلاستیک می گردد. همانطور که ذکر شد تنش و کرنش ماکزیمم اولیه ایجاد شده می تواند در اثر شتاب گرفتن در لحظه اولیه تماس بوده وبعد از این تماس به علت کاهش این شتاب تنش و کرنش ایجاد شده به تبع آن کاهش می یابند. نمودار شتاب برای هر سه جتهت افقی ، عمودی برای این گره در شکل ۶ نشان داده شده است. از شکل ۶ مشاهده می شود ، در هر دو جهت افقی وعمودی نوسان داشته و پس از گذشت مدت زمانی به سمت صفر میل می نماید، علت این موضوع را میتوان کاهش ارتفاع سقوط آزاد در ضربه های پس از ضربه اولیه برشمرد.




شکل۵: نمودار تنش – کرنش برای گره ۸۷




ب الف

شکل ۶: نمودار شتاب– زمان برای گره ۸۷. الف: در جهت افقی، ب : در جهت عمودی.

## نتیجه گیری :

یکی از عوامل مهم صدمات مکانیکی وارد بر محصولات در طی فراوری؛ حمل ونقل و.. پدیده ضربه می باشدکه باید به خوبی این موضوع درک وفهمیده شود. از انجا که روش آزمایشگاهی برای این کار بسیار گران بوده ودر ضمن نمی تواند تمامی جنبه های مسئله راتعین نماید، روش های عددی به خصوص روش المان محدود می تواند روشی کارا وموثر برای فهم پدیده ضربه در مواد پیچیده ویسکوالاستیک به شمار رود. با استفاده از یک روش ترکیبی تحلیلی – عددی می توان ارتفاعی را که باعث عدم آسیب به مواد ویسکوالاستیک می شود را محاسبه نمود .به این ترتیب که با دادن یک ارتفاع فرضی به نرم افزار و خواندن نتایج تنش وکرنش و مقایسه آنها با تنش تسلیم مواد ویسکوالاستیک (البته در موارد کشاورزی تنش بیوژیک تسلیم )به تجزیه وتحلیل مسئله پرداخت و با مشاهده ضریب اطمینان می توان ارتفاع سقوط را افزایش ویا کاهش داد. در ضمن در این تحلیل مشخص گردید که حداکثر تنش وکرنش ایجاد شده در همان ضربه اولیه بین جسم وسطح مسطح می باشد، که علت آن می تواند شتاب ماکزیمم اولیه ایجاد شده در تماس اولیه باشد. وعلت کاهش یافتن شتاب در ضربات بعدی نیز، در نتیجه کاهش ارتفاع سقوط آزاد مواد ویسکوالاستیک می باشد. بنابراین می توان حداکثر کرنش ایجاد شده که با حداکثر آسیب وارد به جسم نسبت مستقیم دارد را تابعی از ارتفاع سقوط جسم دانست.

## پیشنهادات:

یک تحلیل مشابه با داشتن سرعت اولیه،تعیین ضریب اصطکاک های دینامیکی و استاتیکی سطح برخورد ،و موقعیت های قراگیری متفاوت جسم صلب با استفاده از یک کامپیوتر توانا، می تواندبرای نزدیک تر شدن به شرایط واقعی تر انجام گیر د.

منابع:

1-ANSYS,ANSYS- LSDYNA Analysis guide,ANSYS,Inc.,Houston(2004).
2- Puri. V. M. 1995. Physical Properties of Agricultural Material. Penn State University publishing company.
3- Mohsenien.N.N. 1986. Physical Properties of Plant Material. Gordon publishing company
4- Stroshine, R. and Hamann, D.1994. Physical Properties of Agricultural Material and Food Products. Purdue &NCS University- publishing company.