



در این پروژه هدف بررسی فرآیند خم کاری ورق با استفاده از نرم افزار Abaqus CAE و مقایسه نتایج حاصله با نتایج حاصل از روابط کلاسیک می باشد.

در ابتدا به بررسی فرآیند خم کاری ورق می پردازیم و چگونگی عملکرد آن را شرح می دهیم. سپس به قسمت های مختلف فرآیند شبیه سازی شامل هندسه قطعات، چگونگی المان بندی، مدل رفتاری ماده، شرایط مرزی و چگونگی حل بیان می گردد و نتایج استخراج شده از نرم افزار بیان می گردد. در ادامه روابط کلاسیک موجود برای این فرآیند شکل دهی را بررسی می کنیم و با استفاده از این روابط نتایج را برای حالت تئوری بدست می آوریم. در مرحله بعد به مقایسه نتایج عددی و تئوری می پردازیم و درصد خطا محاسبه خواهد شد.

بر اساس روابط مقاومت مصالح برای خمکاری داریم:

$$M = \sigma_f \frac{bh^2}{6}$$

$b$  = عرض ورق

$h$  = ضخامت

### محاسبه ضریب فنریت ورق:

اگر قطعه ای با شعاع  $R$  و زاویه خم  $\theta$  مد نظر باشد باید قالبی طراحی کنیم که شعاع آن  $R'$  و زاویه خم آن  $\theta'$  باشد تا پس از اختتام کار و بازگشت فنری قطعه، قطعه ای با مشخصات  $R$  و  $\theta$  داشته باشیم لذا لازم است روابطی را پیدا کنیم که از روی  $R$  و  $\theta$  بتوانیم  $R'$  و  $\theta'$  را پیدا کرد.

داریم:

$$\frac{\theta' - \theta}{\theta} = \frac{3\sigma_y R}{Et}$$

$$R' = \frac{R}{1 + \frac{3\sigma_y R}{Et}}$$



اگر رابطه فوق تنش یک بعدی فرض شده است اگر مسئله را دو بعدی ببینیم خواهیم داشت:

$$R' = \frac{R}{1 + \frac{2.73\sigma_y R}{Et}}$$

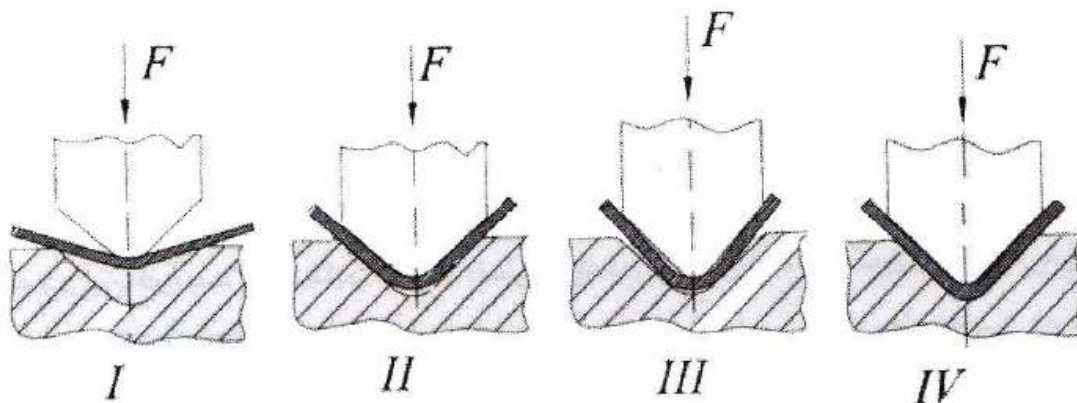
### محاسبه کرنش بحرانی :

کرنش بحرانی کرنشی است که در آن بروز ترک در شعاع بحرانی ورق رخ می دهد. بنابر این در طراحی همواره باید توجه داشته باشیم که مقدار کرنش پلاستیک در لایه بیرونی ورق از ماکزیمم النگیشن تجاوز نکند. کرنش در لایه بیرونی از رابطه زیر بدست می آید که این مقدار باید همواره از میزان کرنش کریتیکال کمتر باشد.

$$\varepsilon = \frac{t}{2R}$$

### خمکاری با پرس بریک:

خمکاری با پرس بریک فرآیندی است که یک قطعه فلزی بین قالبهای بالا و پایین قرار داده می شود و با پایین آوردن سنبه تحت نیرو و فشار اعمال شده، تغییر شکل در قطعه صورت می گیرد. پرس بریک یک نوع پرس مخصوص است که شامل یک سنبه بلند و باریک یک بستر می باشد. جنس ماده قالب متنوع می باشد، از چوب سخت و کاربید برای تولید مواد با مقاومت پایین استفاده می شود. برای بیشتر کاربردها، قالب های فولاد کربن و آهن خاکستری به کار می رود.



### شبیه سازی فرآیند:

برای حل مساله از تقارن صفحه ای استفاده کرده و از تحلیل دو بعدی بهره می بریم، به این شکل که ورق را به یک مستطیل بدون حجم مدل کرده و همچنین سنبه (punch) و ماتریس (die) را صلب فرض کرده و با خط هر کدام را مدل می کنیم.

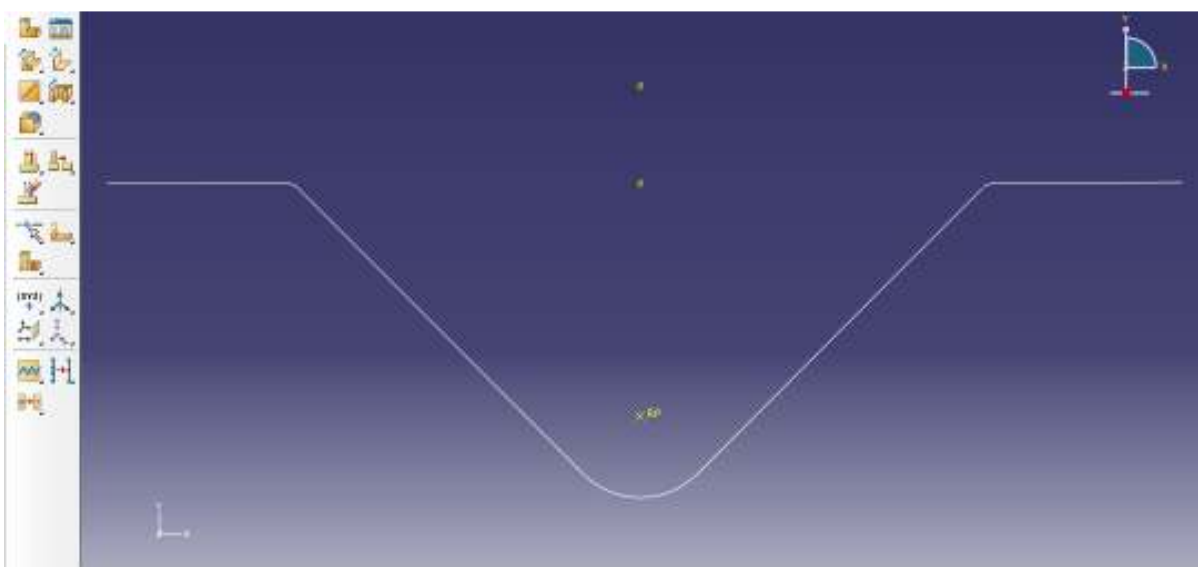
### معرفی هندسه قطعه و قالب:

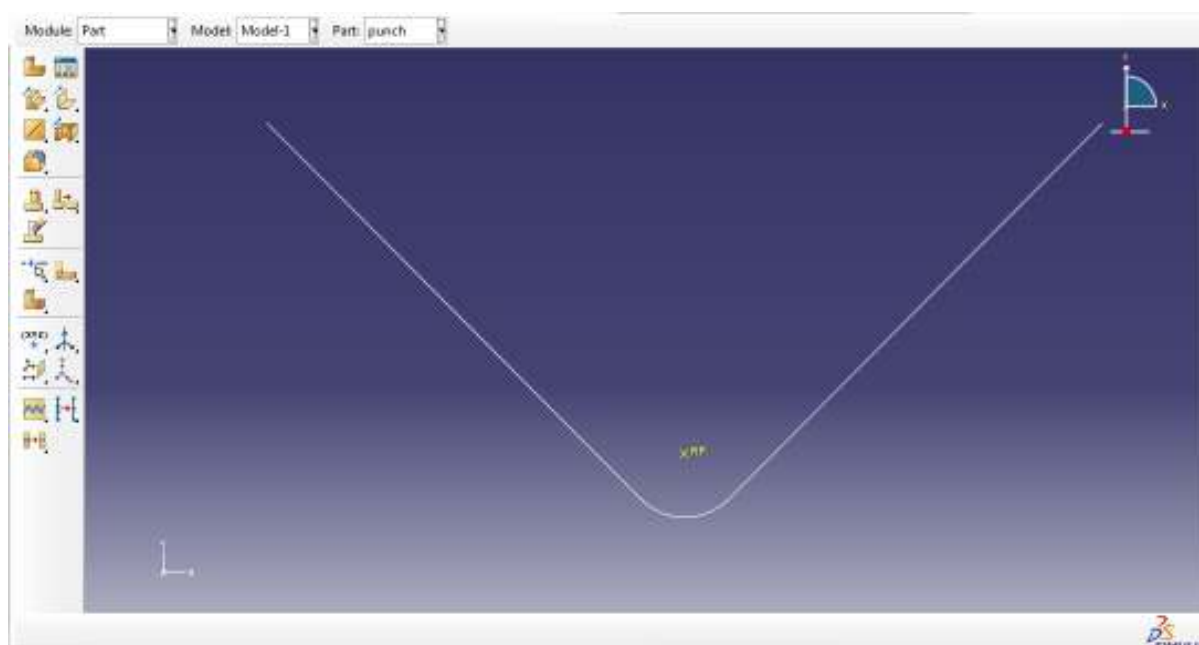
عرض ورق: 60mm	ضخامت: 2mm	زاویه سر سنبه: 90 درجه
عرض دهانه قالب v شکل: 40mm	شعاع سر سنبه: 3mm	شعاع وسط ماتریس: 5mm

برای ایجاد چنین هندسه ای به محیط part رفته و با توجه به قابلیت های بالای Abaqus در مدلسازی هندسه های مورد نظر را ایجاد می کنیم. برای ورق حالت part/2D/deformable/shell را انتخاب کرده و هندسه مربوطه را رسم می کنیم [۱].



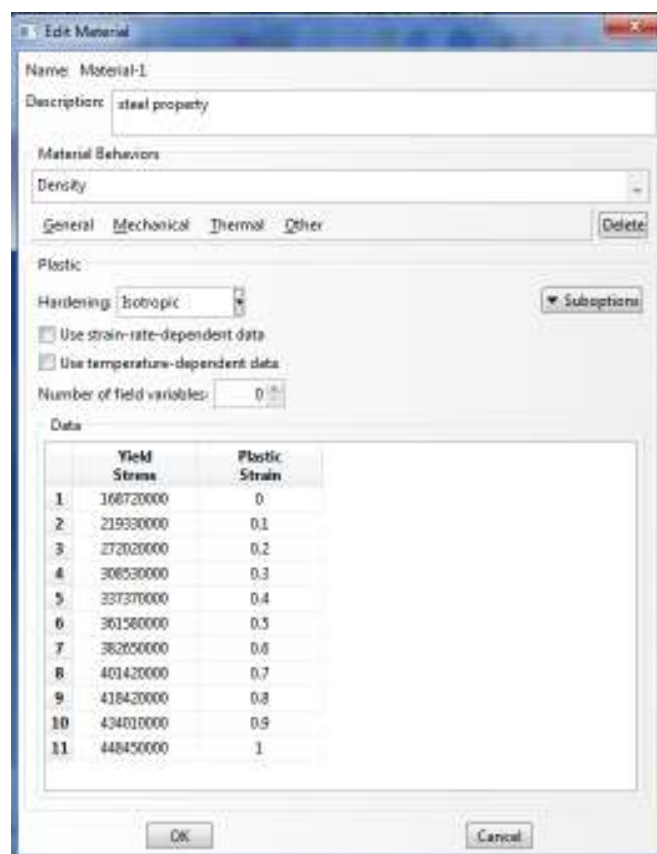
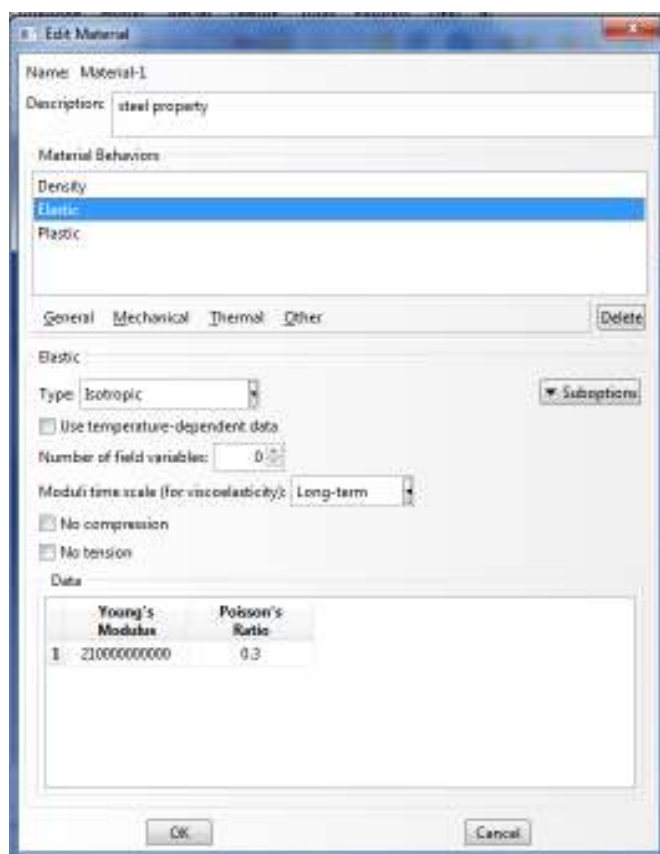
به منظور ایجاد die و punch مسیر part/2D/analytical rigid/wire را رفته و هندسه های مربوطه را ایجاد می کنیم. نکته ی قابل توجه اینکه برای قطعات rigid حتما یک نقطه ی مرجع می بایست انتخاب کنیم (reference point).





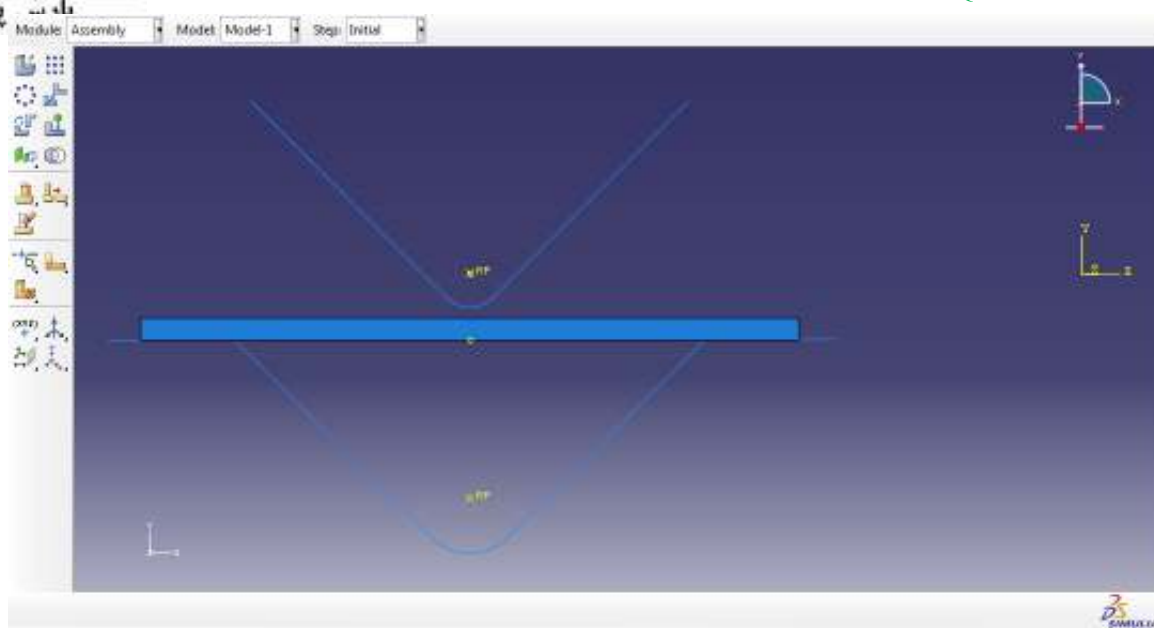
### خواص مکانیکی:

جنس قالب و پانچ فولاد با چگالی ( $7850 \text{ Kg/m}^3$ ) و مدول سفتی الاستیک  $210 \text{E9 Pa}$  برای آنها در نظر گرفته شده و ضریب پواسون را  $0.3$  قرار می دهیم. خواص مکانیکی ذکر شده را در قسمت **creat property** وارد کرده همچنین از آنجایی که در تحلیل مساله وارد ناحیه پلاستیک می شویم، می بایست نقاط تنش کرنش پس از تسلیم را وارد کنیم ، این نقاط از مرجع [۲] وارد شده است.



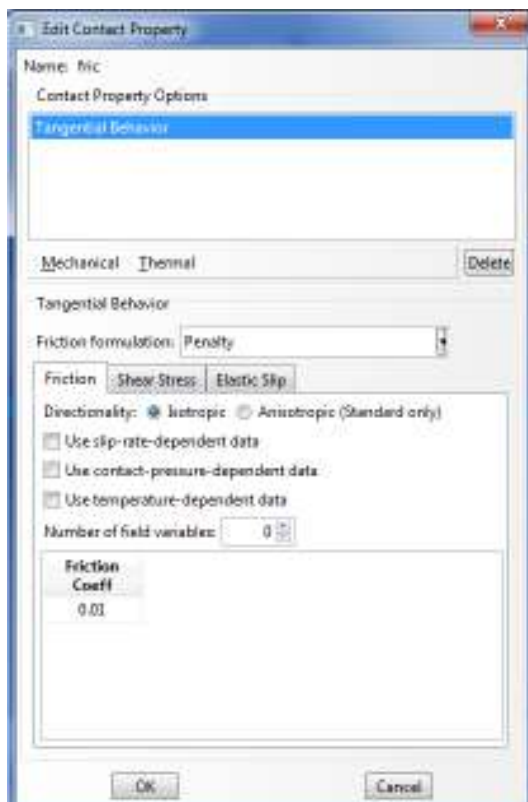
## اسمبل کردن قطعات:

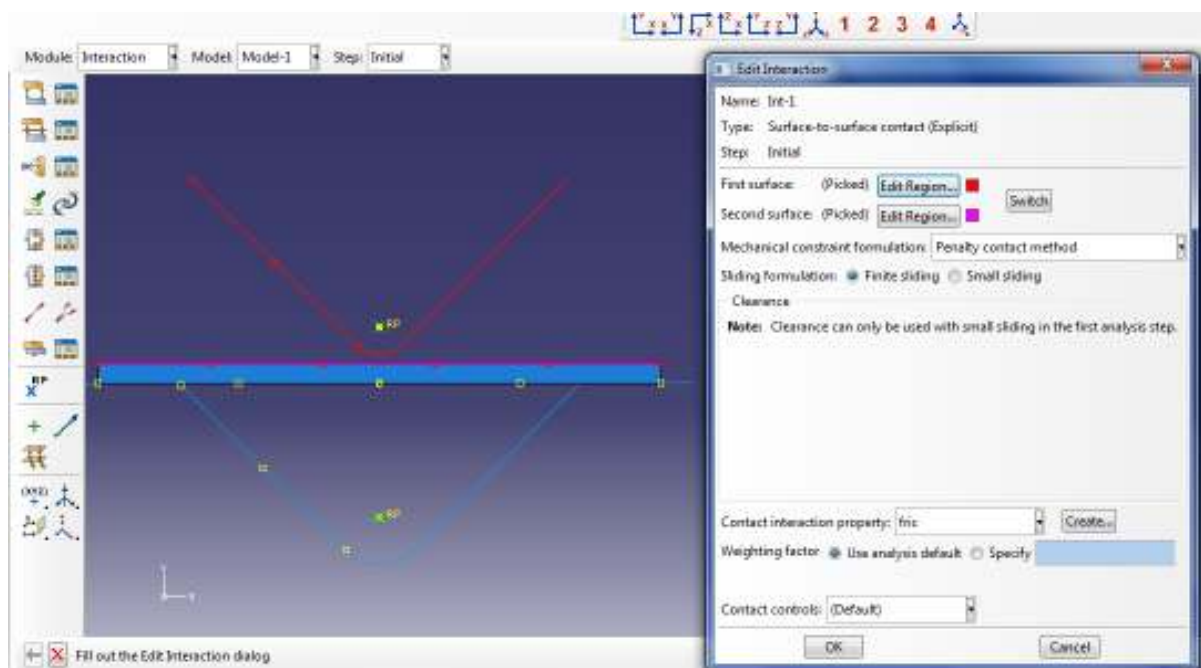
برای این منظور به قسمت assembly رفته و هر سه قطعه را به حالت independent وارد محیط assembly می کنیم. سپس با استفاده از جعبه ابزار موجود در این قسمت قطعات طوری که در واقعیت قبل از انجام خمکاری نسبت به یکدیگر قرار داده می شوند، در موقعیت مورد نظر قرار می گیرند.



تعریف تماس ها:

ضریب اصطکاک در نظر گرفته شده برای این مساله بین سنبه و ورق، همچنین ورق و ماتریس 0.01 تعیین شده است. برای تعریف نوع تماس در قسمت **creat interaction property/contact** نوع تماس را حالت **tangential** قرار داده و ضریب اصطکاک را 0.01 قرار می دهیم. همچنین برای تخصیص اصطکاک تعیین شده در قسمت **creat property** ابتدا برای هر کدام از دو تماس موجود (تماس بین سنبه و ورق، و تماس بین ماتریس و ورق) ابتدا قطعات صلب و سپس ورق را انتخاب میکنیم، سپس در پنجره ی ایجاد شده روش حل مکانیکی را **penalty** در نظر می گیریم.

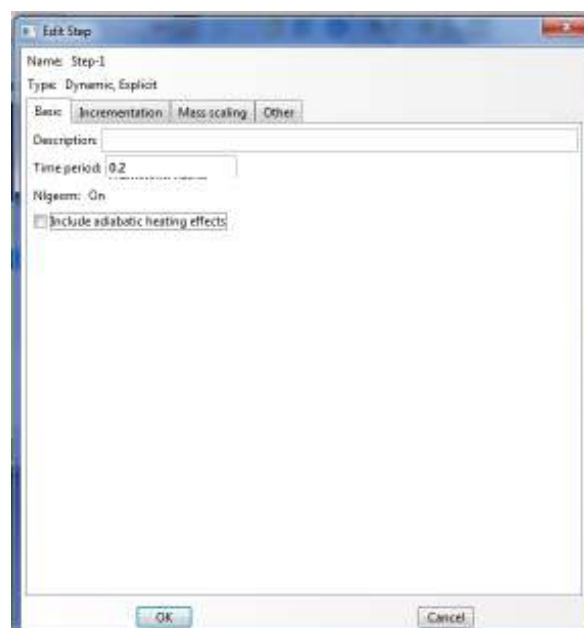
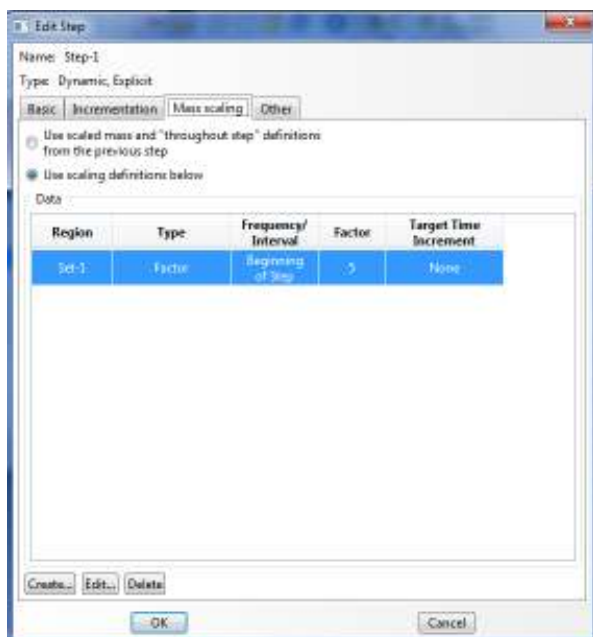




## گام های حل:

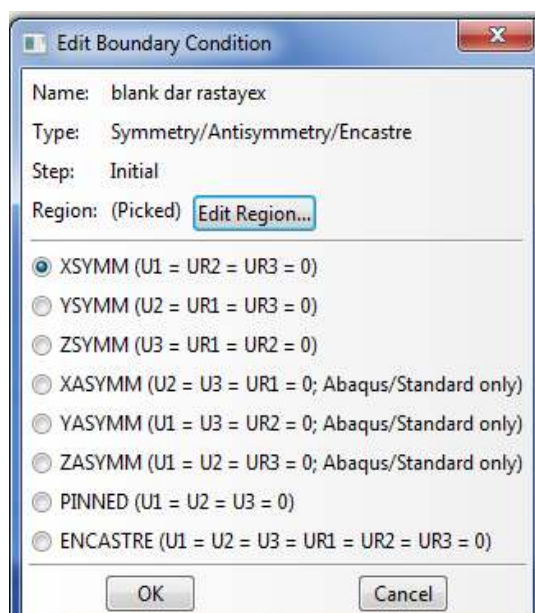
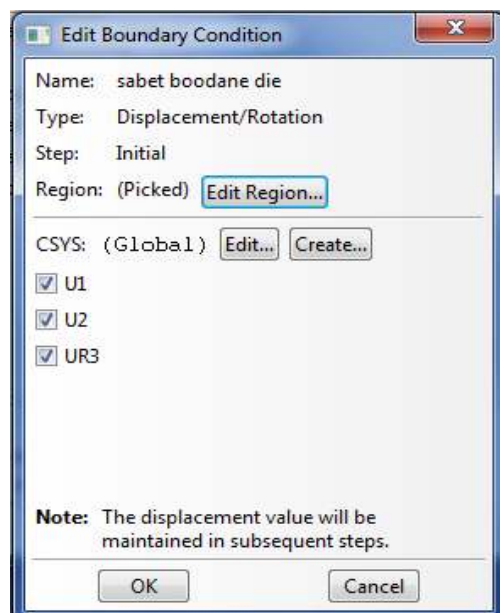
برای تعیین اینکه مساله در چند گام حل شود به قسمت **step** می رویم. نوع حل را در این قسمت از مسیر **creat step/Dynamic, Explicit** تعیین کرده و در ادامه دو گام برای این مسئله تعریف می کنیم، (گام اول پایین آمدن سنبه، گام دوم بالا رفتن سنبه) و برای هر دو گام حل **time priod** را 0.2 در نظر میگیریم. توجه شود زمان ذکر شده در قسمت بارگذاری هنگامی که به سنبه سرعت میدهیم تعیین کننده ی میزان جابجایی می شود که در قسمت بارگذاری بیشتر در این مورد توضیح داده می شود. به دلیل زمان بر بودن مسائل شکل دهی در این قسمت در لبه ی **mass scaling** این میزان را 10 قرار داده تا از مدت زمان حل در انتها کم کنیم.





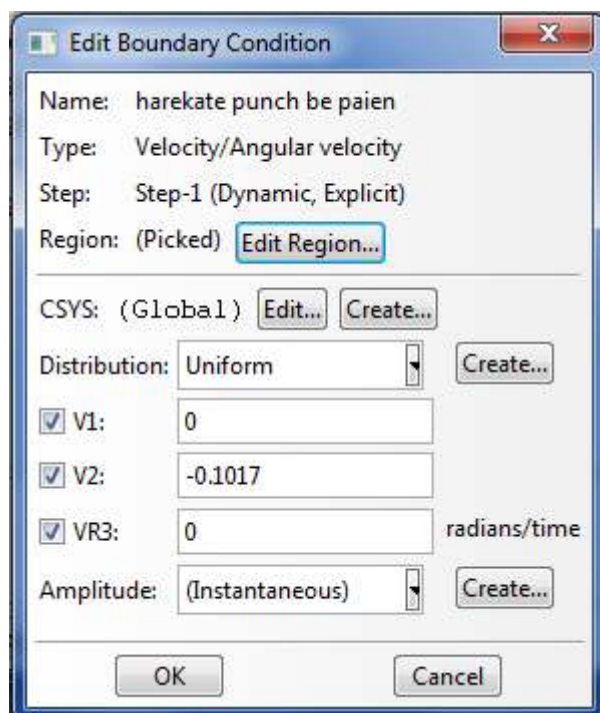
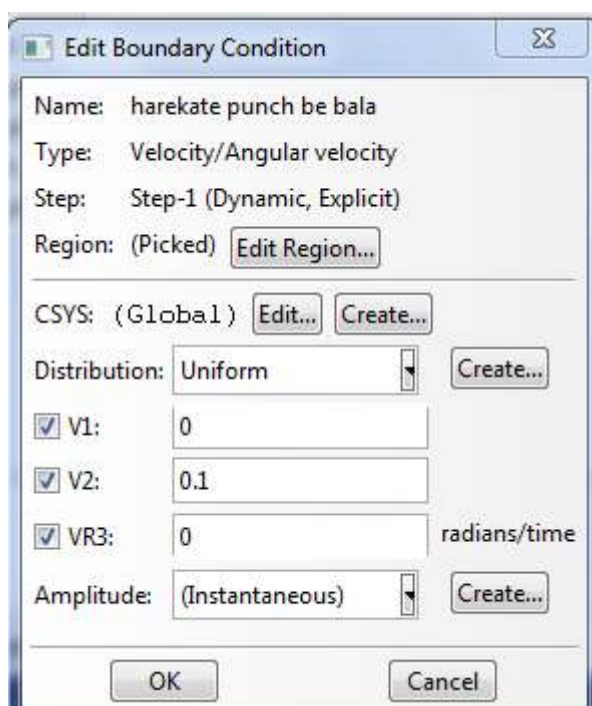
## بارگذاری:

برای تعریف قیود و بارگذاری، به قسمت load رفته و بارگذاری ها را در این قسمت تعیین می کنیم. ابتدا برای ماتریس از گام ابتدایی (initial) تمامی قیود ممکن را قرار داده و آن را کاملاً مقید می کنیم، قیدهای مورد نظر بر روی reference point گذاشته می شوند. همچنین در initial step نقطه ی وسط ورق را در راستای عرضی مقید می کنیم، و تنها به آن اجازه حرکت عمودی می دهیم. نکته ی لازم به ذکر اینکه با قرار دادن قیدهای مختلف در گامهای اولیه، نرم افزار قیدها را تا گام آخر به صورت از پیش تعریف شده قبول کرده و چنانچه در گامی نیاز به حذف قیدی باشد، می بایست آن را در step مورد نظر deactivate کنیم.

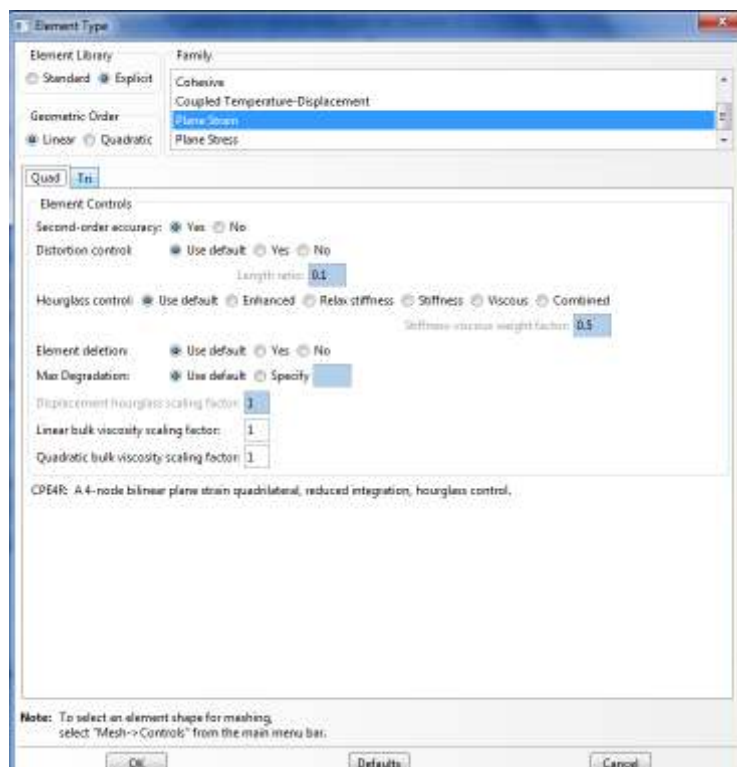


همچنین برای punch در گام اول (step-1) سرعت را  $-0.1017\text{m/s}$  و در گام دوم (step-2) سرعت اخیر را deactivate کرده و سرعت reference point سنبه را  $+0.1\text{m/s}$  تعریف کرده که نشان دهنده ی حرکت سنبه به سمت بالا می باشد. (دلیل تا چند رقم اعشار شدن سرعت سنبه فاصله ی خورده ای دار میان دو reference point می باشد، فاصله ی میان دو نقطه ی مرجع اجسام صلب  $0.02034\text{m}$  بوده و زمان در نظر گرفته شده برای این حرکت  $0.2\text{s}$  می باشد.)

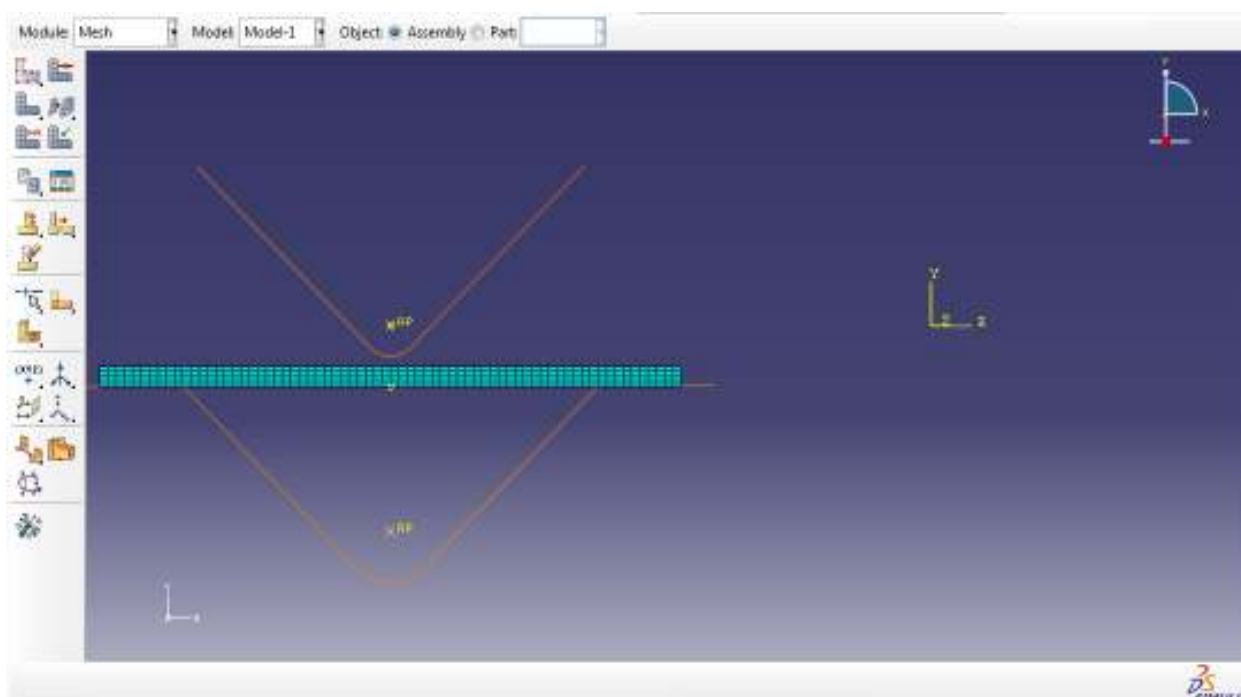
مش بندی:



برای این منظور به قسمت mesh رفته و در main menu ابتدا شکل مش بندی ورق را در mesh control، به حالت structured قرار داده تا سبز رنگ شود سپس در قسمت Element type، در قسمت element library، گزینه ی Explicit را فعال کرده و خانواده ی plane strain را قرار می دهیم. Geometric order را هم linear قرار می دهیم.



نکته ی لازم به ذکر اینکه قطعات rigid نیازی به مش بندی شدن ندارند. در انتها پس از مش بندی شکل زیر را خواهیم داشت:



Job-21 Monitor

Job: Job-21 Status: Completed

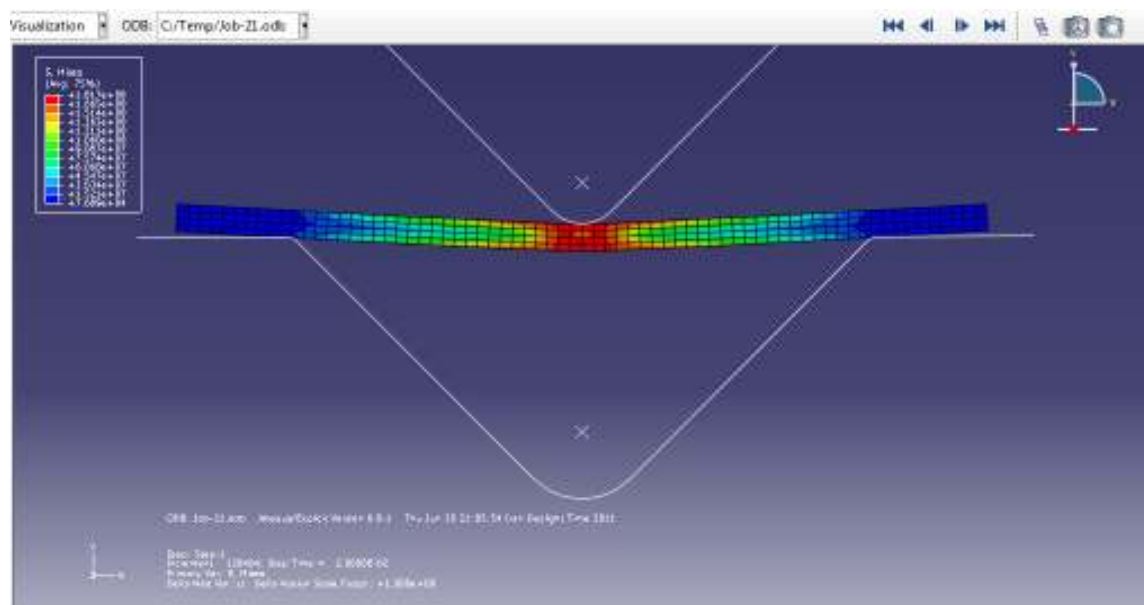
Step	Increment	Att	Severe Discn Iter	Equil Iter	Total Iter	Total Time/Freq	Step Time/LPF	Time/UPF Inc
1	1049240					0.16	0.16	1.47388e-07
1	1116000					0.17	0.17	1.47039e-07
1	1183764					0.18	0.18	1.46818e-07
1	1250873					0.19	0.19	1.47974e-07
1	1320023					0.2	0.2	1.3104e-07
2	70041					0.21	0.0100001	1.42704e-07
2	140021					0.22	0.0200001	1.42771e-07
2	209744					0.23	0.0300001	1.42792e-07
2	289270					0.24	0.04	1.42787e-07
2	359911					0.25	0.05	1.42783e-07
2	421552					0.26	0.0600001	1.4279e-07
2	482193					0.27	0.0700001	1.42808e-07
2	562834					0.28	0.0800001	1.42797e-07
2	613475					0.29	0.0900001	1.42806e-07
2	704116					0.3	0.1	1.42783e-07
2	774757					0.31	0.11	1.428e-07
2	845398					0.32	0.12	1.42818e-07
2	914272					0.33	0.13	1.42844e-07
2	981381					0.34	0.14	1.42836e-07
2	1048490					0.35	0.15	1.42841e-07
2	1115599					0.36	0.16	1.42849e-07
2	1182708					0.37	0.17	1.42838e-07
2	1249817					0.38	0.18	1.42841e-07
2	1316926					0.39	0.19	1.42836e-07
2	1384035					0.4	0.2	1.42827e-07

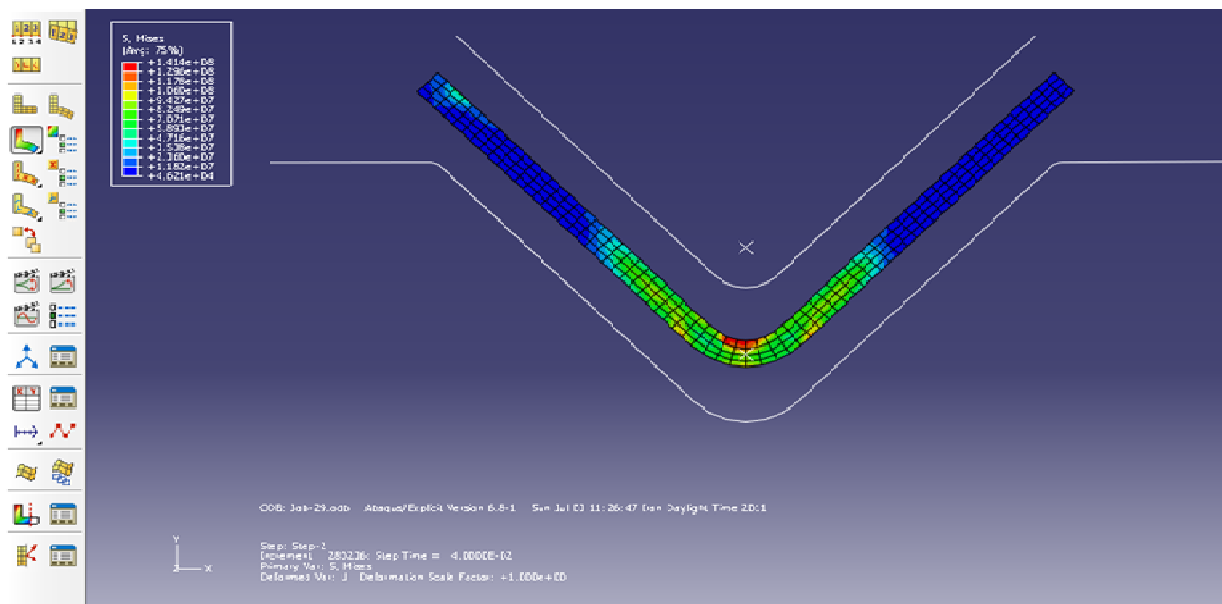
Log Errors Warnings Output

View Result File

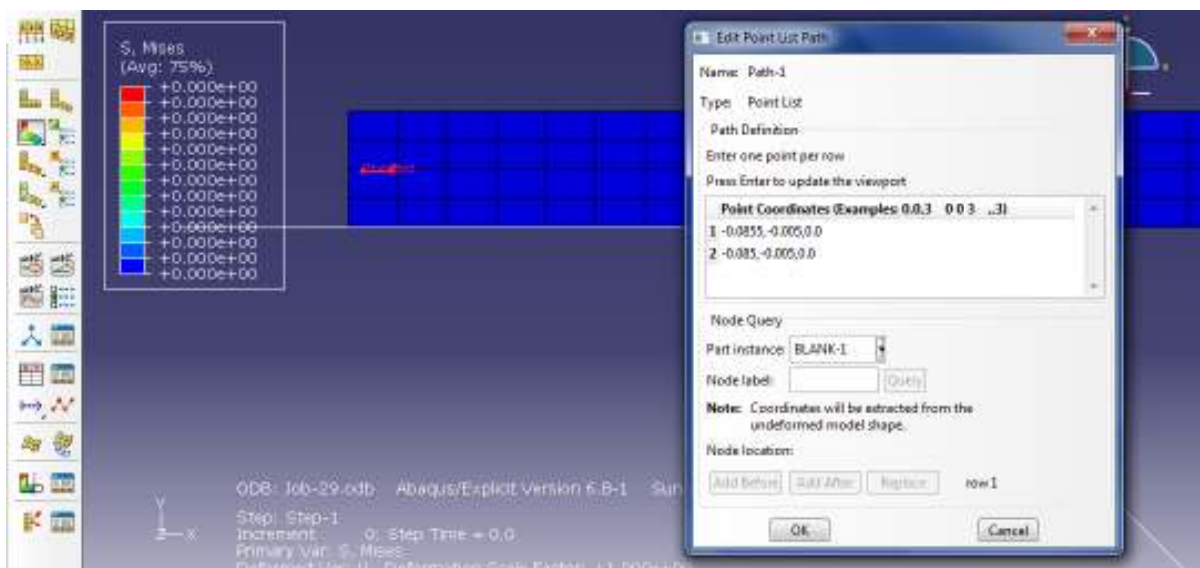
Data

Close





پدیده ی برگشت فنری را با بزرگ نمایی قسمت انتهایی لبه های ورق می توان مشاهده کرد. همانطور که در شکل سمت چپ زیر می بینید پس از بالا رفتن پانچ و پایین رفتن قالب لبه های ورق کمی به سمت داخل برگشته اند. برای محاسبه ی میزان زاویه ی خم جدید پس از بالا رفتن پانچ و پایین رفتن قالب، می توان با تعریف یک مسیر در لبه ی سمت چپ ورقه، مسیری به منظور خواندن جابجایی در راستای یک (Y, X) تعریف می کنیم:





جابجایی در راستای X برای نقطه ی تعریف شده در زمانی که پانچ کاملاً ورق را خم کرده است:

$$U=7.9119e-3$$

جابجایی در راستای X نقطه ی تعریف شده پس از جدا شدن ورق از سنبه و ماتریس:

$$U=7.9211e-3$$

تغییرات جابجایی در راستای X:

$$\Delta u = -0.0000092$$

جابجایی در راستای Y برای نقطه ی تعریف شده در زمانی که پانچ کاملاً ورق را خم کرده است:

$$v = 0.8231e - 3$$

جابجایی در راستای Y نقطه ی تعریف شده پس از جدا شدن ورق از سنبه و ماتریس:

$$v = 0.8281e - 3$$

تغییرات جابجایی در راستای Y:

$$\Delta v = -0.000005$$





$$\Delta^2 = v^2 + u^2 = (1.047e-5)^2 \text{ -----} > \Delta = ds = 1.047e-5$$

$$d\theta = \frac{ds}{r} = \frac{1.047e-5}{3e-3} = 0.00349$$

زاویه به دست آمده برای تغییرات زاویه ی یک لبه بوده و می بایست در عدد ۲ ضرب شود.

$$d\theta = 0.00698$$

زاویه ی بدست آمده بر حسب رادیان است با تبدیل این مقدار به درجه داریم:

$$\Delta\theta = 0.399$$

$$\theta' = 90.399$$

### حل تئوری:

برای حل تئوری در این مسئله در این شبیه سازی فرضیات زیر را داشتیم:

زاویه خم: 90

ضخامت ورق: 2mm

شعاع خم: 3mm

تنش تسلیم: 168720000Pa

بنابراین داریم:



محاسبه شعاع و زاویه خم قالب:

$$\frac{\theta'}{\theta} = 1 + \frac{3\sigma_y R}{Et} \rightarrow \theta' = 90.32^\circ$$

$$\text{درصد خطا} = (90.399 - 90.32) / 90.32 = 0.08\%$$

۱. تحلیل فرآیند خمکاری در یک قالب V و بررسی پدیده ی برگشت فنری در ورق به کمک روش

اجزاء محدود

۲. شبیه سازی رفتار پلاستیک فرآیند کشش عمیق، کتاب آموزش اباکوس ترجمه ی سعید رحمانیان

و محمد ملکی