



## بررسی فرم دهی پانل های انتگرالی بال مرکزی هواپیمایی ایران-140 با استفاده از نرم افزار المان محدود (ABAQUS)

1- سید ابراهیم حسینی<sup>1</sup>

شرکت صنایع هواپیما سازی ایران (هسا)  
seh5390@yahoo.com

2- سعید غلامی

شرکت صنایع هواپیما سازی ایران (هسا)  
saeid6@gmail.com

3- دکتر محسن لوح موسوی

استادیار: دانشگاه آزاد خمینی شهر  
lohmousavi@gmail.com

### چکیده:

بال هواپیمایی ایران - 140 از دو بخش مرکزی و بیرونی تشکیل شده است ، مخزن سوخت در بالهای بیرونی قرار دارد، بال مرکزی از 6 عدد پانل بصورت باکس تشکیل شده است ، برای دستیابی به وزن کمتر ، پانلهای فوق را بصورت انتگرالی می سازند، بنابراین پانلهای انتگرالی مقاومت بسیار خوبی در مقابل نیروهای ایرو دینامیکی دارند. بدلیل ماشین کاری قسمتهای از پانل فرم دهی آنها بسیار پیچیده می باشد ، کانتور ایرو دینامیکی پانلهای فوق مطابق کانتور هواپیما می باشد ، این مسئله در نرم افزار المان محدود (ABAQUS) تحت آنالیز وحل قرار می گیرد ، تکنولوژی فرآیند فرم دهی و بدست آوردن نیروی لازم فرم دهی ، تنش بوجود آمده در قطعات از اهداف این مقاله می باشد ، متریال پانلهای فوق B-95 (V-95) روسی می باشد ، جهت تعیین مشخصات متریال از نمونه های اکسترود فورج استفاده شده و تحت آزمایش کشش قرار گرفته و دیاگرام مربوطه تهیه گردید تاثیر متریال فوق نسبت به مشابه غربی آلیاژ آلومینیوم 7075 در فرم پذیری و اعمال نیرو و تنش بوجود آمده در پانلهای مورد بررسی قرار می گیرد ، نحوه توزیع تنش و دیاگرام نیرو و جابجایی نسبت به زمان و نحوه مناسب فرم دهی از نتایج مهم این مقاله می باشد.

واژه های کلیدی: ABAQUS , stringer , rib , cavity , B-95

<sup>1</sup>- سید ابراهیم حسینی



### 1- مقدمه

هواپیمای ایران-140 یک هواپیمای مسافربری کلاس 52 نفره می‌باشد. بال هواپیمای فوق از دو قسمت بیرونی و مرکزی تشکیل شده است. بال مرکزی بصورت یک جعبه (box) روی بدنه نصب می‌شود، متریال پانل‌های بالایی B-95 روسی معادل آلیاژ آلومینیم 7075 غربی با کیفیت بهتر و مقاومت بیشتر در مقابل نیروی وارده در کشش و متریال پانلهای پایینی از 1932 معادل آلیاژ آلومینیم 7050 غربی می‌باشد. جهت تعیین مشخصات متریال با توجه به روش تولید آن که اکستروژن فورج شده می‌باشد دو نمونه ی تست (test piece) آماده و به آزمایشگاه ارسال گردید. نتایج بدست آمده از مشخصات متریال از نمونه های آزمایشی نیز به قطعه کار نسبت می‌دهیم. پانلهای فوق بصورت انتگرالی با روش ماشینکاری و فرم دهی تولید می‌شوند، جهت مقاومت بیشتر، خواص مکانیکی بهتر و سبک سازی، stringer ها و rib ها در پانل‌ها ایجاد می‌گردد [1,2]. این پانلها بایستی کانتور بال هواپیما داشته باشند. برای شکل دهی پانل‌های فوق از روش قالب و پرس استفاده میشود که مزایای زیادی از جمله هزینه پایین ابزار، زمان کوتاه سیکل کاری و سازگاری آن با کانتورهای مختلف دارد [1] ولی با اینحال ایجاد کانتور در پانلهای انتگرالی یکی از مشکلات مهم در تولید آنهاست، لذا موارد مهم در فرم دهی پانلهای مذکور شامل نیروی لازم پرس، تنش‌های ایجاد شده در قطعه کار فرم دهی و مقدار جابجایی پانچ می‌باشد. چند روش برای فرم دهی پانل‌های فوق وجود دارد مانند: الف- فرمینگ به روش حرارت، ب- فرمینگ به روش پرس، ج- فرمینگ به روش رولینگ، که برای پانل‌های فوق بهترین روش پرس می‌باشد.

برای فرم دهی در روش پرس به دو صورت ممکن مورد بررسی قرار می‌گیرد. 1- فرم دهی قبل از ماشین کاری و ایجاد حفره ها (cavities) بصورت انتگرالی در پانل.

2- فرم دهی بعد از ماشین کاری و ایجاد حفره ها (cavities) و ایجاد stringer و پایه rib در خود پانل.

1- ایجاد کانتور قبل از ماشین کاری به آسانی انجام می‌گیرد اما انجام ماشین کاری و ایجاد حفره (cavity) در پانل چون بعد از فرم دهی حالت منفی بخود می‌گیرد امکان پذیر نمی‌باشد، بنابراین فرم دهی قبل از ماشین کاری اجرایی نمی‌باشد. همین

طور اگر بعد از فرم دهی ماشین کاری صورت گیرد تنش‌های موجود در قطعه بر اثر عملیات ماشین کاری آزاد شده و فرم لازم از دست می‌دهد.

2- ایجاد کانتور بعد از ماشین کاری حالت اجرایی داشته و به راحتی میتوان ابتدا پانل مسطح را ماشین کاری نمود، لذا این روش اجرایی می‌باشد. بدلیل ماهیت منفصل چند نقطه‌ای فرآیند شکل دهی به روش فوق شامل چند مرحله مطابق پلن طرح می‌باشد.

عوامل مهم در فرم دهی کانتور پانل‌های انتگرالی به روش قالب و پرس عبارتند از نقطه اعمال نیروی خمش و مقدار جابجایی پانچ، همچنین طراحی روش فرم دهی با خمش پرس کلید حل مسئله است، از طرفی کیفیت فرم دهی بسیار مهم می‌باشد. با استفاده از نرم افزار المان محدود ABAQUS می‌توان روش فرم دهی را طراحی کرد و اشکالات احتمالی بر طرف نمود، ایجاد مدل قابل اعتماد در نظر ابزار نقطه کلیدی از مطالعات پروسه فرم دهی می‌باشد [1,2] بنابر این اینها مسائل مختلف در بررسی پروسه فرم دهی خمشی در نرم افزار المان محدود از پانل انتگرالی آلیاژ آلومینیم هواپیما می‌باشد مرحله فرمینگ اولین مرحله باتوجه به زمان تعیین شده و مقدار جابجایی پانچ مرحله برگشت پذیری فنری (Spring back) در حالت explicit انتخاب می‌کنیم. ضروری است که مدل را با مشخصات و ابعاد دقیق در نرم افزار تعریف کنیم، ابتدا مسئله را بصورت دو بعدی حل نمودیم و نتایج بدست آوردیم که با توجه به پیچیدگی شکل پانل بصورت انتگرالی نتایج فوق رضایت بخش نمی‌باشد. لذا حتما بایستی مسئله را در حالت سه بعدی حل کرد. بررسی انجام شده بر روی مقالات گوناگون حاکی از آن است که پروسه حل در محدوده الاستیک می‌باشد [1]، لذا کاربردی نمی‌باشد اما این مقاله بایستی در محدوده پلاستیک حل شود. یکی از مسائل مهم تهیه مدل اصلی پانل در ماژول مدل سازی نرم افزار می‌باشد که طی چندین مرحله انجام گردیده. مسئله مهم بعدی طراحی و بهینه سازی پانچ (سنبله) و قالبها می‌باشد که آن هم طی چندین مرحله انجام گردیده است. جهت کاهش زمان حل و بدلیل محدودیت‌های سخت افزاری تا آنجا که امکان دارد مدل را ساده سازی می‌



کنیم بنا بر این صورت متقارن صفحه ای (symmetric) در نظر گرفته شده است.

## 2- تعریف مسئله :

بررسی فرم دهی پانل های بال مرکزی هواپیمای ایران-140 با استفاده از روش المان محدود، نرم افزار (ABAQUS).

بال فوق از دو بخش بیرونی و مرکزی تشکیل شده که با چندین پیچ قوی به هم متصل می گردد، طول بال مرکزی 2.626 m باشد و دقیقا روی بدنه نصب می گردد، بال مرکزی هواپیمای فوق از 6 عدد پانل همراه با Rib، Spar و معلقات دیگر تشکیل می شود،

پانل های بال بیرونی بصورت مونتاژی از پوسته و Stringer با استفاده از پرچکاری (rivet کاری) تولید می گردد، در صورتیکه پانل های بال مرکزی بصورت یک تکه و انتگرالی (یعنی Rib, stringer در خود پانل) تولید می گردد.

می باشد که جزء پانل های بالایی است، ابعاد اولیه پانل فوق به طول 2626mm و عرض 645mm و ضخامت 40mm با متریل آلایژ آلومینیم B-95 روسی بصورت اکستروژد فورج شده با کانتور بال هواپیما مورد استفاده می باشد.

## مشخصات متریل :

همانطور که ذکر شد متریل پانل های فوق از آلایژ آلومینیم B-95 شرفی تقریبا معادل آلایژ AL 7075 غربی می باشد که مشخصات آن بر اساس اطلاعات گرفته شده از کتاب [6] و تست انجام شده در آزمایشگاه به شرح ذیل است.

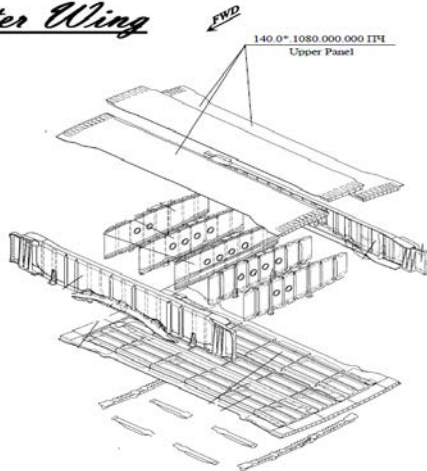
دانسیته Mass density :  $2.78 \text{ gr/cm}^3$

مدول یانگ Young s modulus :  $70e9 \text{ Pa}$

ضریب پواسون Poisson s ratio: 0.3

خواص پلاستیک مطابق یک آزمایش کشش به شرح ذیل بدست آمد.

## Center Wing



شکل (1) مجموعه انفجاری بال مرکزی هواپیمای ایران-140

متریل پانل های بالایی با متریل پانل های پایینی متفاوت بوده و دلیل آن نیز بدین شرح است که پانل های بالایی تحت کشش واقع می شوند و پانل های پایینی تحت فشار.

بزرگترین و پیچیده ترین پانل شماره 140.00.1050.001

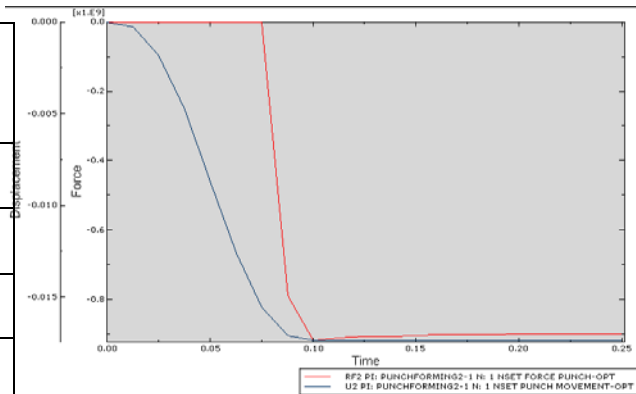


دیاگرام (1) دیاگرام تست کشش آزمایشگاهی

## جدول (1) نتایج خواص پلاستیک



Yield stress (Mpa)	Plastic strain (mm/mm)
594.1437e6	0
597.0008e6	0.03818
599.1437e6	0.04454
600.6068e6	0.05723

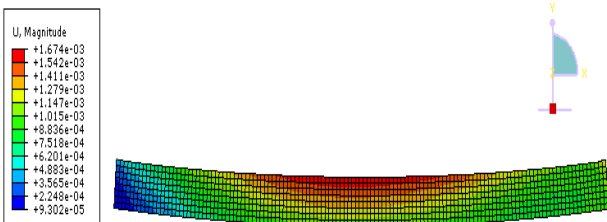


دیگرام (2) نمودار نیرو و جابجایی نسبت به زمان

متریال فوق آلیاژ آلومینیم و روی می باشد که بدلیل وجود عنصر روی در ساختار خود بالاترین استحکام کششی را در بین همه گروه های آلیاژهای آلومینیم دارا می باشد ، خاصیت دیگری که عنصر روی در ساختار متالوگرافی ایجاد می کند قابلیت پیر سختی مصنوعی می باشد بطوریکه در بعضی حالت‌های عملیات حرارتی از نظر استحکام با فولاد برابری می کند ، با انجام عملیات حرارتی می توان مقاومت به خستگی را افزایش داد ، به همین دلیل از متریال های فوق در بدنه هواپیماهای جنگی استفاده که فشار زیادی تحمل می کنند ، از مزایای دیگر آلیاژ فوق قابلیت فورج پذیری خوب آن می باشد . استانداردهای این متریال در فرم های مختلف متفاوت می باشد که نشان از اهمیت فوق العاده این آلیاژ در صنایع هوایی دارد.

### 3-روش اجراء :

ابتدا جهت بررسی رفتار کلی پانل و روش اجرای کامل فرآیند فرم دهی در نرم افزار و بدست آوردن نتایج اولیه یک بار پروسه را بصورت دو بعدی بطور کامل تحلیل نرم افزاری می نمایم ، با توجه به نتایج بدست آمده از تحلیل فوق در می یابیم که فرم دهی به روش پرس خنثی برای این فرآیند مناسب می باشد ، ولی با توجه به پیچیدگی پانل اصلی حتما بایستی بصورت سه بعدی تحلیل شود.



شکل (3) پانل فرم دهی شده (دو بعدی)

### 1-3: تعیین خواص

ابتدا دو عدد نمونه تست (test piece) مطابق شکل (4) جهت تست از متریال اکستروود شده آماده سازی و جهت کشش و بدست آوردن مشخصات متریال به آزمایشگاه از سال نمودیم ابعاد تحت کشش نمونه مطابق استانداردهای هرابی \* 13 \* 1002.5 mm می باشد .



شکل (4) نمونه تست کشش

نمونه آزمایشگاهی را بین دو فک دستگاه کشش قرار داده و فکها محکم می کنیم ، لازم به توضیح است که فک دستگاه کشش هیدرولیکی می باشد و احتمال جابجا شدن نمونه تستی بسیار کم و تقریبا صفر است ، همانطور که در شکل مشخص است دستگاه کشش سنج که به کامپیوتر متصل است بر روی نمونه تستی نصب می کنیم . سپس نمونه را تحت کشش قرار می دهیم تا به تنش تسلیم برسد و دچار پارگی (شکست) شود .



شکل (5) نمونه تحت تست کشش بعد از تسلیم

از آن طرف گراف تنش توسط رایانه مطابق شکل ترسیم می‌گردد [دیگرام 1] و ما با استفاده از گراف فوق می‌توانیم مدول الاستیسیته  $E$ ، تنش تسلیم  $\sigma_y$  و... بدست آوریم.

$$E = 70 \text{ GPa} \quad \sigma_y = 510 \text{ MPa}$$



شکل (6) نمونه تسلیم شده

### 2-3: ساده سازی

#### الف: ساده سازی هندسی

با توجه به پیچیدگی پانل بایستی مدل را بصورت سه بعدی در نرم افزار ABAQUS ایجاد کرد. در این مرحله جهت ساده سازی مسئله و کم کردن زمان حل با توجه به تقارن صفحه ای، آنرا به صورت symmetric مدل می‌نماییم.

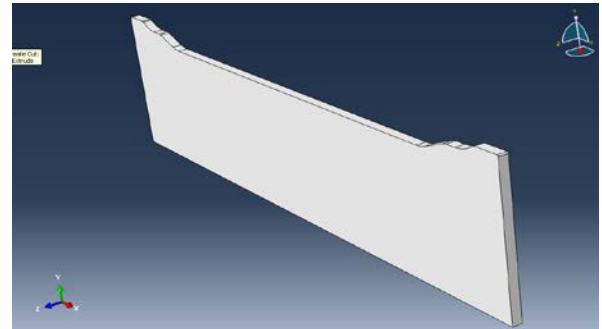
#### ب: ساده سازی متریال:

متریال فوق بصورت همگن و همسانگرد فرض شده، همینطور خواص متریال در طول فرآیند مستقل از دما است و با توجه به نمودار تنش - کرنش رفتار پلاستیک ماده چند خطی فرض می‌شود.

شرایط مرزی و شرایط بار گذاری مطابق شرایط واقعی لحاظ گردیده است.

### 3-3: مدل سازی

در ماژول part پانل را به ابعاد 2626mm در 645mm در 40mm مدل می‌نماییم.



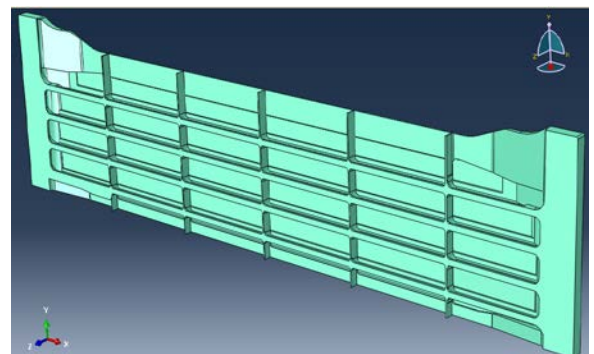
شکل (7) مدل پانل

در همین ماژول برای تهیه مدل ماشین کاری نیاز به چندین مدل قطعه جهت ایجاد حفره ها در پانل نیاز می‌باشد. جهت بوحود آوردن شکل انتگرالی پانل حدودا 17 عدد مدل دیگر مانند شکل حفره ها مدل سازی می‌گردد.



شکل (8) نمونه مدل‌های برشی در پانل

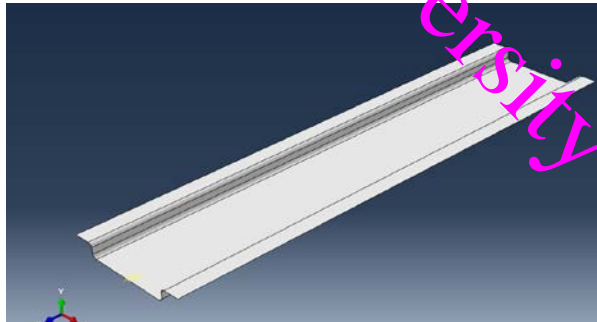
برای نهایی نمودن مدل اولیه پانل آنرا در محیط (ماژول) Assemble با استفاده از مدل های برشی با روش cut شکل انتگرالی ایجاد می‌نماییم، یعنی اینکه معادل مدل ماشینکاری شده تهیه می‌گردد/



شکل (9) مدل پانل ماشین کاری شده

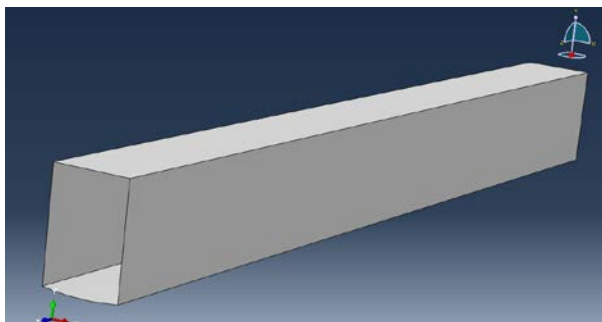
### 4-3: طراحی قالب و سنبه

با توجه به کانتور پانل تعداد دو عدد قالب و یک سنبه (پانچ) با شعاع (450mm) و اندازه مناسب طراحی می‌گردد. با توجه به تغییر شکل بسیار ناچیز پانچ و قالب آنرا بصورت صلب در نظر می‌گیریم، و چون هدف بررسی و آنالیز پانل می‌باشد و با توجه به اینکه در نرم افزار Abaqus مدل صلب نیاز به مش بندی ندارد. لذا برای کاهش زمان حل و حافظه اشغال شده پانچ و قالب بصورت Analytical ایجاد می‌شوند.



شکل (10) قالب شماره 2

برای تمام مراحل فقط از یک سنبه استفاده می‌شود که شعاع قسمت فرم دهنده بر اساس کانتور قطعه بدست آمده است.



شکل (11) سنبه

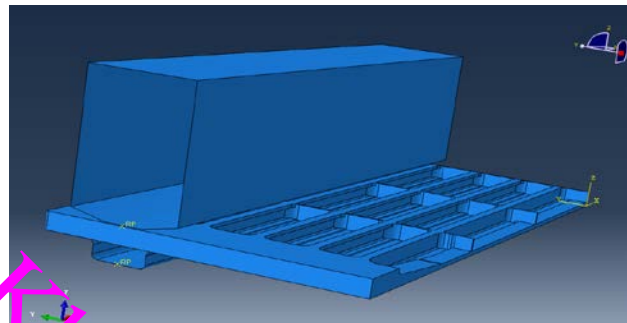
### 3-5- اختصاص متریال به پانل

در این ماژول ابتدا خواص متریال بدست آمده از آزمایش و استفاده از کتاب مانند دانسیته ( $2.78 \text{ gr/cm}^3$ )، مدول یانگ ( $70e9 \text{ Pa}$ )، ضریب پواسون (0.3)، و خواص پلاستیک مطابق جدول 1 وارد نموده و به مدل اختصاص می‌دهیم.

### 3-6: مونتاز

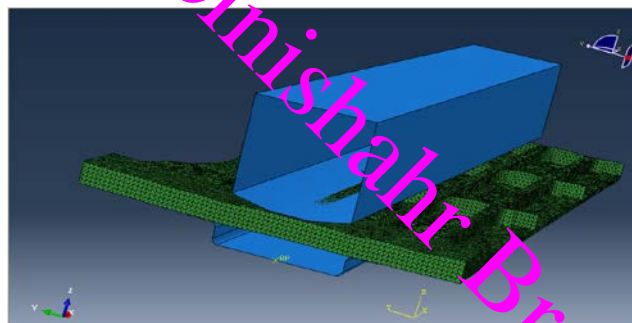
در این ماژول ابتدا پانل تهیه شده همراه با حفره های ایجاد شده در ماژل مدل سازی فراخوان می‌گردد و جهت ساده سازی آنرا نصف نموده و در ماژول بار گذاری شرایط مرزی تقارن اعمال می‌شود، سپس قالب و سنبه فراخوان می‌شوند و برای مرحله اول

فرم دهی مانند شکل مونتاز می‌گردد، لازم به توضیح است که یک set برای نقطه مرجع پانچ جهت تعیین نیروی عکس العمل وارد بر آن تعریف می‌گردد، با توجه به فرآیند فرم دهی که در چند مرحله تکمیل می‌شود بنابراین به چند مرحله مونتاز نیاز می‌باشد.



شکل (12) مونتاز قالب شماره 1 و پانل و سنبه مرحله اول

همانطور که در شکل شماره 12 مشخص است پانل اولیه برای مونتاز فراخوان شده است.



شکل (13) مونتاز قالب شماره 1 و پانل و سنبه مرحله پنجم

مطابق با شکل شماره 13 پانل بعد از حالت برگشت پذیری مرحله چهارم فراخوان شده است.

### 3-7: ایجاد فرایند حل

در این ماژول فرآیند مورد نیاز برای حل تعریف می‌شود که برای هر مرحله می‌توان چندین step داشت ولی در این پروژه برای هر مرحله فقط یک step حل مورد نیاز می‌باشد در همین ماژول خروجی های مورد نیاز مانند توزیع تنش در پانل، توزیع کرنش های معادل در پانل، نیروی لازم پانچ و مقدار جابجایی پانچ جهت فرمینگ تعریف می‌گردد. برای تسریع در حل از خاصیت mass scale نیز می‌توان استفاده کرد.

### 3-8: تماس بین اجسام

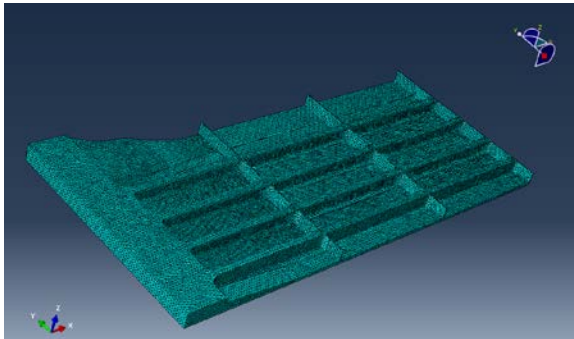
در این ماژول ابتدا مقدار اصطکاک معادل (0.7) بین اجسام تعریف می‌شود، سپس به تعریف تماس بین پنچ و پانل و همچنین قالب و پانل برای هر مرحله تعریف می‌گردد، با توجه به اینکه بهترین رابطه برای حذف تماس بین اجسام در فرایند های فرم دهی بخاطر نفوذ پذیری کم پنچ در پانل رابطه penalty می‌باشد از این رابطه استفاده می‌شود.

### 9-3: اعمال شرایط مرزی و جابجایی

در این ماژول برای هر مرحله شرایط مرزی تعریف می‌شود که برای قالب تمام درجات آزادی آن بسته شده و از حرکت آن در تمام جهات در طول حل جلوگیری می‌شود، برای پنچ حرکت در جهت فرم دهی به مقدار لازم در هر مرحله داده شده و از حرکت آن در جهات دیگر ممانعت می‌گردد. برای پانل نیز فقط شرایط تقارن صفحه ای اعمال می‌شود.

### 10-3: مش بندی

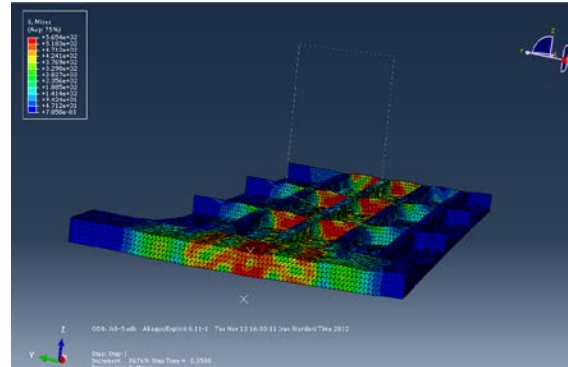
با توجه به پیچیدگی های پانل فوق و نیز اینکه مش بندی با تکنیک free و المانهای چهار وجهی یا Tet برای نواحی سه بعدی دارای هندسه پیچیده نیازی به پارتیشن بندی ندارد بهترین انتخاب است.



شکل (14) پانل مش بندی شده

### 11-3: اجرای تحلیل

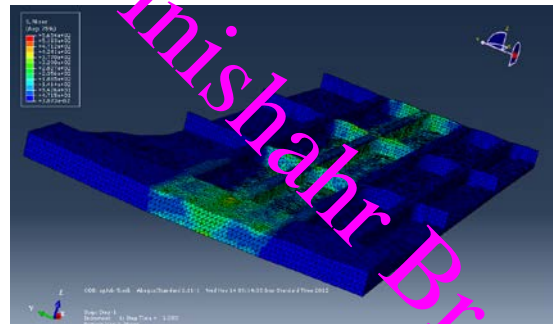
در این ماژول آنالیز ایجاد شده برای هر مرحله اجرا می‌گردد و نتایج مورد نظر استخراج می‌گردد برای نمونه نیرو و جابجایی مرحله 5 در زیر می‌آید.



شکل (15) پانل بعد از فرم دهی مرحله پنجم

### 4: فرآیند بازگشت پذیری

مطابق با شرایط واقعی پس از اتمام هر مرحله فرم دهی پنچ را از روی پانل برداشته و اجازه می‌دهیم که پانل بحالت آزاد برگردد (یعنی حالت برگشت پذیری) و از این حالت پانل برای مرحله بعدی فرم دهی استفاده می‌گردد. و این عمل تا آخرین مرحله که پانل فرم نهایی را بدست می‌آورد تکرار می‌شود.



شکل (16) پانل بعد از برگشت پذیری مرحله پنجم

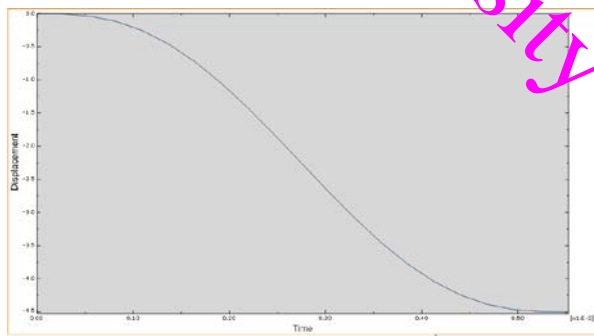
### 5: نتایج

باتوجه به نتایج آنالیز کلیه مراحل فرم دهی مشخص می‌شود که در مرحله 5 بیشترین مقادیر جابجایی، تنش و کرنش بوجود می‌آید.

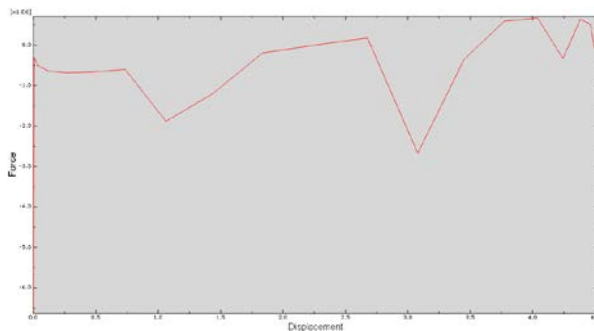
دیگرامها، مقادیر تنش و توزیع آن روی پانل در مرحله 5 در دیگرام های ذیل مشخص می‌گردد.



دیاگرام (3) تحلیل نیروی پرس نسبت به زمان



دیاگرام (4) تحلیل جابجایی پرس نسبت به زمان



دیاگرام (5) تحلیل نیروی پرس نسبت به جابجایی

2- مقدار تنش در پانل ، نیروی لازم در پانچ و مقدار جابجایی پانچ در برخی مراحل بر اساس نمودار، مطابق جدول 2 می باشد  
3- با بررسی های صورت گرفته هیچگونه ترک ، پارگی و چروکیدگی مشاهده نشد.  
4- براساس آنالیز در مرحله 5 بیشترین نیرو توسط پانچ اعمال می شود که تناژ مورد نیاز پرس به مقدار 800 تن بدست می آید.

جدول (2) نتایج سه مرحله اصلی

تنش (Mpa)	نیرو (N)	جابجایی (mm)
565	7060	مرحله 3
564	3980	مرحله 4
565	2670	مرحله 5

#### 4- منابع:

- [1]- YAN Yu , WAN Min , WANG Haibo” FEM equivalent model for press bend forming of aircraft integral panel, Trans. Nonferrous Met. Soc. China 19(2009) 414-421 .  
[2]- Yan Yu\*, Wan Min, Wang Haibo , Huang Lin” Design and Optimization of Press Bend Forming Path for Producing Aircraft Integral Panels with Compound Curvatures”, Chinese Journal of Aeronautics 23(2010) 274-282  
[3]- YAN Yu , WAN Min , WANG Haibo , HUANG Lin” Optimization of press bend forming path of aircraft integral panel”, Trans. Nonferrous Met .Soc. China 20 (2201) 294-301  
[4]- S.Z. Hu!, \*, L. Jiang,” A finite element simulation of the test procedure of stiffened panels”, Marine Structures 11 (1998) 75-99  
[5]- Se Yun Hwang, Jang Hyun Lee \_\_, Yong Sik Yang, Mi Ji Yoo,” Springback adjustment for multi-point forming of thick plates in shipbuilding”, journal homepage: [www.elsevier.com/locate/cad](http://www.elsevier.com/locate/cad).  
[6]- Amin Khalili , Ali kaveh , surush shahabi practical metallurgy of eastern materials ”, 10 (2012) 41-59

#### 6- بحث و نتیجه گیری

برای بدست آوردن روش مناسب فرم دهی دو الی سه روش مورد بررسی قرار گرفت مانند روش پی در پی و حرکت قطعه بین قالب و پانچ و ... که نتیجه قابل قبولی در بر نداشتند نهایتاً فرآیندی مشخص شد که یک مرحله فرم دهی اعمال شود و سپس برگشت پذیری انجام گیرد و این پروسه چند مرتبه تکرار گردید ، با اجرای کامل این فرآیند در نرم افزار المان محدود (ABAQUS) نتایج مهم ذیل کسب گردید

1- روش مناسب برای فرم دهی پانل به روش پرسی خطی در چند مرحله بدست می آید که مهمترین هدف این پژوهش می باشد