

تحلیل و بهینه سازی ساندویچ پانل با در نظر گرفتن استحکام تحت بار گذاری خمشی

سامان حبیبی*

*کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشکده مکترونیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج

خلاصه

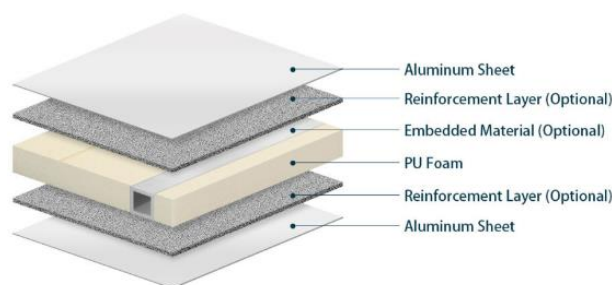
استفاده از ساختارهای کامپوزیتی به دلیل خواص مکانیکی مطلوب و نسبت استحکام به وزن بالا در کاربردهای مختلف مانند صنایع هوافضا، کشتی سازی و حمل و نقل مورد توجه قرار گرفته است. در این رابطه ساندویچ پانل ها با داشتن شکل های مختلف هندسی در هسته و همچنین انواع جنس مواد به کار رفته و ضخامت های مختلف در تجهیزات مختلف مهندسی مورد توجه فزاینده ای قرار گرفته است. در این پژوهش، رفتار خمشی ساختار ساندویچی با لایه های کامپوزیت گرافیت اپوکسی، شیشه اپوکسی و آلومینیوم و هسته از جنس های فوم پلی اورتان، آلومینیوم، و لانه زنبوری مورد تحلیل قرار گرفته است. برای تحلیل رفتار خمشی، از روابط نهایی در روش ناویر و برنامه نویسی ۷۰۰ خطی در متلب استفاده شد به علاوه به منظور صحت سنجی تحلیل از مدلسازی المان محدود برای یکی از نمونه های بررسی شده در آزمون تنش در نقاط رویه میان و زیرین لایه ها استفاده شد. در این تحلیل مقادیر نهایی متغیرهای طراحی شامل جنس لایه ها و جنس هسته، ضخامت لایه ها و هسته و همچنین تنش های بیشینه خمشی تعیین شد و اثر متغیرهای طراحی بر روی بار بحرانی خمشی مورد تحلیل قرار گرفت، همچنین به منظور عدم عدول از حد استحکام، تئوری تی سای هیل مورد استفاده قرار گرفت. در این تحقیق تعیین شد که ساندویچ پانل با لایه های گرافیت اپوکسی و شیشه اپوکسی با داشتن هسته فومی پلی اورتان بیشترین مقاومت یا ظرفیت بار خمشی را با مقدار ۳۲.۵ مگا پاسکال تحمل کرده اند همچنین افزایش ارتفاع هسته با همان نسبت میزان بار بحرانی را کاهش داده است. در بخش بهینه سازی با استفاده از روش بهینه سازی الگوریتم ژنتیک تک هدفه در متلب یک پاسخ نهایی از متغیرهای بهینه حاصل شد و وزن بهینه کل سازه ساندویچ پانل با مقدار ۴.۳ کیلوگرم حاصل شد به علاوه ۵۵٪ از ضخامت کل در بهینه سازی در مقایسه با بخش تحلیل کاسته شد اما بار خمشی ۳۸٪ کاهش یافت.

کلمات کلیدی: ساندویچ پانل، کامپوزیت، خمشی، استحکام، روش ناویر، برنامه نویسی متلب، تحلیل المان محدود، الگوریتم ژنتیک، وزن.



1- مقدمه

استفاده از ساختارهایی با نسبت استحکام بالا به وزن از مهمترین مسائل طراحی و ساخت در صنایع میباشد. سازه های ساندویچی نوعی از سازه های مرکب هستند که شامل دو لایه مستحکم با خواص مکانیکی زیاد و یک هسته ضعیف تر با چگالی کمتر اما ضخیمتر در بین ورق ها میباشد. و به دلیل وزن کم، استحکام و سختی بالا، به طور گسترده در سازه های پیشرفته مانند صنایع هوافضا، دریایی و حمل و نقل استفاده میشوند [1] شکل ۱ نمای انفجاری یک سازه ساندویچ پانلی را نشان میدهد.



شکل ۱: نمای انفجاری از چینش سازه ساندویچ پانل [۲]

تحقیقات زیادی در حوزه پانل های ساندویچی انجام شده است. وکلی یفرد و همکاران [3] یک ساندویچ پانل چندلایه ایزوتروپیک معرفی و بهینه سازی کرده اند در این تحقیق رفتار خمشی پانل ساندویچی با هسته موجدار را بررسی کرده و ساندویچ پانل بهینه با استفاده از الگوریتم ژنتیک معرفی کرده اند. نتایج نشان داد که پیکربندی بهینه شده میتواند مقاومت خمشی بهتری با ثابت ماندن وزن بهینه را به دست آورد. حبیب نیا و همکاران [4] صفحه انتهایی ساندویچی لانه زنبوری را در دو حالت فوم دار و بدون فوم تحت تست های خمشی و فشار بررسی کرده اند. نتایج نشان داد که استفاده از فوم در هسته لانه زنبوری منجر به کاهش وزن لایه ها میشود اما استحکام خمشی را نیز کاهش میدهد در نتیجه، نوع بدون فوم دارای استحکام خمشی بهتری میباشد وانگ و همکاران [5] ساختار ساندویچی با لایه کامپوزیت تقویت شده با الیاف شیشه و هسته لانه ای فومی را مطالعه کرده اند. در این بررسی اثر ضخامت، ارتفاع و فاصله لانه مشبک روی مود شکست، استحکام خمشی سازه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج تجربی افزایش بالای ۴۰٪ استحکام خمشی نهایی نسبت به سازه ساده به دلیل وجود هسته شبکه بندی شده را نشان داده است. سان و همکاران [6] رفتار شکست و خردشدگی پانل ساندویچی لانه زنبوری آلومینیومی را با آزمون خمش سه نقطه ای و آزمون فشار محوری بررسی کرده اند نتایج این تحقیق مشخص کرد که مد تخریب ساندویچ پانل ها تحت تأثیر پارامترهای ساختاری در آزمون خمش سه نقطه ای قرار دارد. وانگ و همکاران [7] تأثیر ضخامت و چگالی هسته بر خواص ساندویچ پانل با جنس کامپوزیت الیاف کربن و هسته لانه زنبوری آلومینیومی را مورد بررسی قرار داده اند. در این بررسی نشان داده شد که افزایش چگالی یا ضخامت هسته استحکام مواد را افزایش میدهد، درحالیکه چگالی متوسط، سختی خمشی را به حداکثر میرساند. دلیری و زینالدینی [8] رفتار خمشی ساندویچ پانل از جنس کامپوزیت شیشه با هسته موجدار با طراحی جدید را بررسی کرده و تأثیر چیدمان موج هسته در جهت طولی یا عرضی بر خواص مکانیکی سازه ساندویچ پانل و تأثیر دوره تناوبهای مختلف را بررسی کرده بودند نتایج نشان میداد که میزان جذب انرژی برای پانلهای ساندویچ با هسته موجدار دوطرفه در جهت عرضی در مقایسه با هسته های معمولی (بدون موج) افزایش یافته است.

نصیری و همکاران [9] متغیرهای مؤثر در فرآیند شکلدهی آزاد ورق تحت بارگذاری انفجاری در عمق اب را بهینه سازی کرده اند. نتایج به دست آمده نشان داد که مدل ارائه شده توسط نرم افزار برای این آزمایش مناسب بوده و مقادیر به دست آمده از



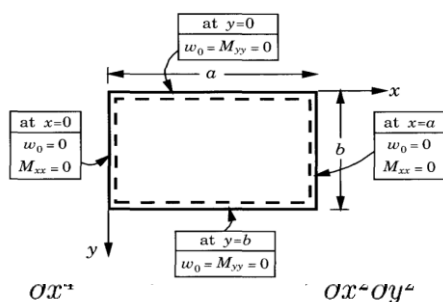
پیش بینی مدل با نتایج خروجی مطابقت دارد. همچنین، حالت بهینه برای کمترین تغییر ضخامت و بیشترین میزان تغییر شکل دائمی ورق ارائه شد.

در مطالعه حاضر رفتار خمشی ساختار ساندویچی با بررسی انواع نمونه های سه لایه ای از کامپوزیت های گرافیت اپوکسی، شیشه اپوکسی و همچنین آلومینیوم و هسته هایی از جنس های مختلف فوم، آلومینیوم و هانی کوم تحت بارگذاری قائم با استخراج روابط ریاضی نهایی از حل مساله ناویر و برنامه نویسی ۷۰۰ خطی در متلب بررسی شد و تاثیر جنس لایه ها و ضخامت در مقدار بار بحرانی تعیین شد در این تحقیق تنش های خمشی در نقاط مختلف سطح، وسط و زیر لایه ها محاسبه شد و حداکثر تنش وارد شده در هر لایه استخراج شد. یکی از موردهای بررسی شده را به عنوان پاسخ تحلیل در نظر گرفته شد و با تحلیل المان محدود آباکوس مقایسه و اعتبارسنجی شد. سپس با بهینه سازی الگوریتم ژنتیک یک مقادیر بهینه از همه متغیرهای طراحی تحت حدود استاندارد و با قید استحکام شکست لایه ای تی سای هیل متلب حاصل شد و یک ساندویچ پانل بهینه شده با وزن کمینه به دست آمد.

۲- استخراج روابط بارهای بحرانی

راه حل های تحلیلی از صفحات ارتوتروپیک با استفاده از نظریه لمینیت کلاسیک توسعه داده شده است یعنی صفحاتی که ضرایب خمش کشش اتصال B_{ij} و خمش-ضرایب چرخش D_{16} و D_{26} صفر هستند. تجزیه و تحلیل ورقه های ویژه ارتوتروپیک بسیار ساده است زیرا تغییر شکل خمیدگی از تغییر شکل کششی جدا شده است: $D_{16} = D_{26} = 0$ در روش های حل مورد استفاده در اینجا روش Navier و Levy است که با رویکرد حالت فضایی و روش ریتز انجام گرفته است راه حل Navier می تواند برای یک ورقه مستطیل زمانی که تمام چهار لایه ورق با شرایط مرزی ساده است توسعه یابد و راه حل های Levy را می توان برای صفحات با دو لبه ورق مقابل هم، به سادگی توسعه داد و دو لبه باقی مانده هر ترکیبی از مرز را ممکن میسازد. [10]

۲-۱ خم شدن ورق ساندویچ پانل با ساپورت های ساده



در این تحقیق خم شدن استاتیک ورق را در غیاب اثرات حرارتی در ورق در نظر گرفته شده است. [10]

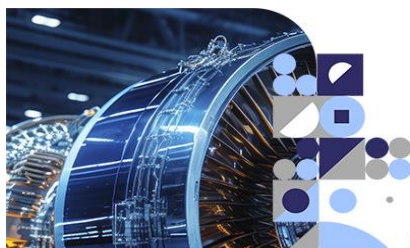
$$D_{22} \frac{\partial^4 w_0}{\partial y^4} = q \quad (1)$$

شکل ۲: هندسه، سیستم مختصات و

شرایط مرزی

شرایط مرزی ساده شده بر روی چهار لبه صفحات مستطیلی (شکل ۲) می تواند با معادلات ۴.۲.۳ به صورت زیر بیان شود:

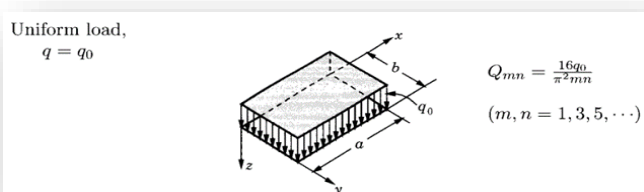
$$\begin{aligned} w_0(x, 0) = 0, \quad w_0(x, b) = 0, \quad w_0(0, y) = 0, \quad w_0(a, y) = 0 \\ M_{xx}(0, y) = 0, \quad M_{xx}(a, y) = 0, \quad M_{yy}(x, 0) = 0, \quad M_{yy}(x, b) = 0 \end{aligned} \quad (2)$$



جایی که لنگرهای خمشی مربوط به انحراف عرضی معادلات هستند:

$$\begin{aligned} M_{xx} &= - \left(D_{11} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} + D_{12} \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \right) \\ M_{yy} &= - \left(D_{12} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} + D_{22} \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \right) \\ M_{xy} &= -2D_{66} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \end{aligned} \quad (3)$$

۲-۲ راه حل Navier



در روش Navier جابه جایی W_0 در یک تابع فوریه مثلثاتی دوگانه با توجه به پارامترهای ناشناخته گسترش یافته است. انتخاب توابع مثلثاتی محدود به مساله هایی است که شرایط مرزی را برآورده می کنند. مساله $q(x,y)$ نیز در سری های دوقطبی مثلثاتی گسترش می یابد. جایگذاری تغییر مکان ها و بسط نیرو در معادله حاکم باید در

یک بسط معادله جبری در میان پارامترهای بسط تغییر مکان نتیجه دهد. [10] (یک راه حل شکل بسته با استفاده از سری های ماشه-انومتريک دوگانه پیشنهاد شده توسط Navier نیز پیشنهاد شده است. [11]). شکل ۳: توزیع تنش یکنواخت

در ورق مستطیلی

تنشهای درون صفحه ای از معادله (۴) محاسبه

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix}^{(k)} = z \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}^{(k)} \begin{Bmatrix} -\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ -\frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ -2\frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

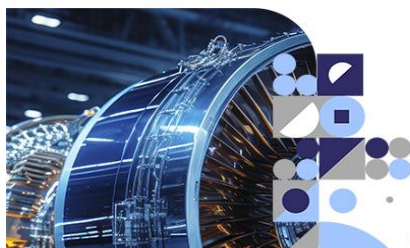
میشوند. [10]

$$\begin{aligned} \sigma_{xx}^{(k)}(x, z) &= \frac{M(x)z}{b} \left(\bar{Q}_{11}^{(k)} D_{11}^* + \bar{Q}_{12}^{(k)} D_{12}^* + \bar{Q}_{16}^{(k)} D_{16}^* \right) \\ \sigma_{yy}^{(k)}(x, z) &= \frac{M(x)z}{b} \left(\bar{Q}_{12}^{(k)} D_{11}^* + \bar{Q}_{22}^{(k)} D_{12}^* + \bar{Q}_{26}^{(k)} D_{16}^* \right) \\ \sigma_{xy}^{(k)}(x, z) &= \frac{M(x)z}{b} \left(\bar{Q}_{16}^{(k)} D_{11}^* + \bar{Q}_{26}^{(k)} D_{12}^* + \bar{Q}_{66}^{(k)} D_{16}^* \right) \end{aligned} \quad (5)$$

k شمارنده هر لایه است و Q ها درایه های سفتی های انتقال یافته با جهتگیری های مشخص الیاف است.

۲-۳ تنش های بحرانی

تنش های عمودی بیشینه در مختصات $(x,y,z)=(a/2,b/2,h/2)$ اتفاق می افتند و بیشترین تنش های برشی در $(x,y,z)=(a,b,-h/2)$ اتفاق می افتند.



$$\sigma_{xz} = \frac{h^2}{8} \left[1 - \left(\frac{2z}{h} \right)^2 \right] \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} T_{12}^{(1)} W_{mn} \cos \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}$$

$$\sigma_{yz} = \frac{h^2}{8} \left[1 - \left(\frac{2z}{h} \right)^2 \right] \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} T_{13}^{(1)} W_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b}$$

$$\sigma_{zz} = -\frac{h^3}{48} \left\{ \left[1 + \left(\frac{2z}{h} \right)^3 \right] - 3 \left[1 + \left(\frac{2z}{h} \right) \right] \right\} \times$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} T_{33}^{(1)} W_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}$$

تنش های دورن لایه ای به طور یکسان صفر هستند که معادلات آن با تئوری کلاسیک لایه ای بدست آمده است، با این حال با استفاده از معادلات تعادل سه بعدی تنش داریم: (معادلات ۶: مقابل)

در انتگرال معادلات تنشی-تعادلی تنش های $(\sigma_{zz}, \sigma_{yz}, \sigma_{xz})$ در $z=h/2$ صفر در نظر گرفته شده اند زیرا با توجه به تئوری ورق لایه

ای در $z=h/2$ ، $\sigma_{zz} = -q$ است. تنش های اصلی بر اساس [12] انجام گرفته بود طبق بررسی های انجام گرفته و روابط ذکر شده [10] کاملاً منطبق با مرجع [12] بوده است.

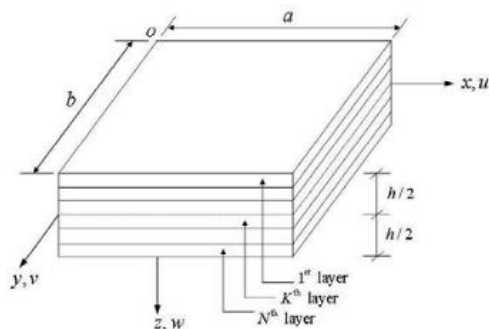
۳- طرح برنامه نویسی در متلب

کدنویسی آنالیز تنش های اصلی در سطح بین و زیر لایه ها براساس روابط موجود در [12] انجام گرفته است. فرمول های اصلی در برنامه نویسی متلب کد نویسی میشوند. کد نویسی تنش های اصلی و برشی برای تک لایه ها بر اساس [12] مطابق با [10] انجام میگردد. در ادامه مراحل کد نویسی ذکر میشود:

۱- اعمال نیرو و محاسبات ضرایب زاویه های انتقال یافته الیاف. ۲- محاسبه سفتی های جدید ۳- اخذ پارامتر مدول های معادل چندلایه از یک زیربرنامه دیگر کدنویسی ۴- محاسبات کرنش های لایه میانی و انحراف زاویه ای ۵- محاسبات کرنش ها و تنش های اصلی ۶- محاسبات قیود شکست تک لایه و حد شکست کامپوزیت ها و سپس بعد حد شکست مجموعه ساختار ساندویچ پانل ۷- محاسبات وزن لایه ها بر اساس چگالی لایه ها ۸- طراحی متغیرهای سه لایه های و اختصاص متغیرها ۹- محاسبات روابط خمش و تغییر شکل ها و در نهایت بارهای بحرانی لایه ها

۳-۱- ابعاد و مواد انتخابی

نمونه مورد آزمایش یک ساندویچ پانل با طول، 1.3462m، عرض 0.59944 m [11] تحت نیروی عمود (فشار) ۱۷۲ kpa است که از سه لایه متقارن دارای هسته تشکیل میشود هر لایه میتواند از سه گروه مختلف کامپوزیت شامل گرافیت اپوکسی، گلس اپوکسی و فلز آلومینیوم استفاده شود و برای هسته نیز از گروههای فوم پلی اورتان فلز آلومینیوم و ساختار لانه زنبوری استفاده شده است. با تقسیم لایه دوم به دو بخش این لایه پایین و بالای هسته قراردادده میشود. براساس نظریه ورق و پوسته ها ترتیب هسته بر اساس تعداد لایه به شیوه ای چپش میشود که کمترین تنش بر اساس بارگذاری عمودی به ورق وارد شود. [10]



شکل 4: هندسه و سیستم های مختصات لایه ها [11]

۳-۲- خواص لایه ها و هسته

خواص مکانیکی لایه ها و هسته های مورد بررسی در جداول ۲ و ۳ آورده شده است. لازم به ذکر است در مرجع این بخش خواص اجزا کامپوزیت جدا آورده شده است اما با درصد ترکیب الیاف و رزین مناسب یا والیوم فرکشن میتوان خواص نهایی را بدست آورد (به معنای توان است) [12].

جدول ۲- معرفی خواص لایه

Grafit Epoxy	Glass Epoxy	Aluminium
E1=181e9	E1=38.6e9	E1=7508e6
E2=10.3e9	E2=8.27e9	E2=7508e6
G12=7.17e9	G12=4.14e9	NU12=.333
NU12=0.28	NU12=0.26	NU21=.333
NU21=.2	NU21=0.26	G12=2700e6
rho=1600	rho=1800	rho=2758

جدول ۳- معرفی خواص هسته

Foam	Aluminium	Honey Com
E1=18e6	E1=7508e6	E1=40e6
E2=18e6	E2=7508e6	E2=40e6
V=.33	NU12=.333	V=.27
G12=40e6	G12=2700e6	G12=60e6
ro=75e6	ro=2758	ro=100e6

ها

۳-۳- تنش های تسلیم

به منظور اعمال قید شکست لایه ها معیار تنس ساید هیل بر اساس حد تسلیم لایه ها انجام گرفته است. روابط تنش های تسلیم لایه ها و هسته برای در جداول ۴ و ۵ آمده است. نحوه محاسبه حد شکست لانه زنبوری نیز با روابط حاکم آورده شده است. [12]

Foam	Aluminium	Honey Com
sigma1T_ult=130e6	sigma1T_ult=130e6	Mx=Nz*.5*Lx
sigma1C_ult=100e6	sigma1C_ult=100e6	My=Nz*.5*Ly
sigma2T_ult=100e6	sigma2T_ult=100e6	fc=max((Mx)^2/(D(1,1))*



تسلیم لایه ها

		$t_{core}), (My)^2/D(2,2)*t_{core})$
$\sigma_{1C_ult}=100e6$	$\sigma_{2C_ult}=100e6$	$cond3=(\min(\sigma_{12}(1,1), \sigma_{12}(2,1)))/f_c$
$\tau_{ult}=100e6$	$\tau_{ult}=100e6$	-

جدول ۵: تنش

تسلیم هسته

Grafit Epoxy	Glass Epoxy	Aluminium
$\sigma_{1T_ult}=1500e6$	$\sigma_{1T_ult}=1026e6$	$\sigma_{1T_ult}=130e6$
$\sigma_{1C_ult}=1500e6$	$\sigma_{1C_ult}=610e6$	$\sigma_{1C_ult}=100e6$
$\sigma_{2T_ult}=40e6$	$\sigma_{2T_ult}=31e6$	$\sigma_{2T_ult}=100e6$
$\sigma_{2C_ult}=246e6$	$\sigma_{2C_ult}=118e6$	$\sigma_{2C_ult}=100e6$
$\tau_{ult}=68e6$	$\tau_{ult}=72e6$	$\tau_{ult}=100e6$

جدول ۴: تنش

۴-۳- متغیرهای طراحی

متغیر	نام متغیر	متغیر	نام متغیر
X(1)	Nplies(1)	X(۶)	Matlayer(2)
X(2)	Matlayer(1)	X(7)	tply(2)
X(۳)	tply(1)	X(۸)	Matlayer(3)
X(۴)	Matcore	X(۹)	tply(3)
X(۵)	tcore		

برای سه لایه ساندویچ پانل متغیرهای ۹ عددی در متلب تعریف میشوند که به جز عدد اول که نشانه تعداد لایه هاست بقیه اعداد شامل متغیرهای ۳ تایی شامل جنس کامپوزیت جنس هسته و ضخامت لایه میباشد متغیر چهارم نیز هسته میباشد. که جنس آن از فوم پلی اورتان با خواص مناسب در این تحقیق است. (جدول ۶)

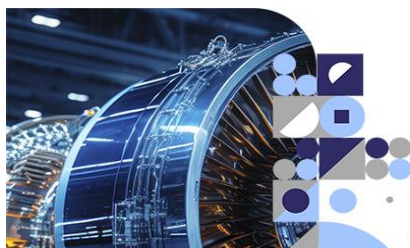
جدول ۶- معرفی متغیرهای ورق ۳ لایه ای

۵-۳- معیار شکست

برای محاسبه تنش لایه ها پاسخ تنش حداکثر با معیار شکست تی سای هیل چک میشود و برای هر لایه و در نهایت کل لایه ها آن کدنویسی ترتیب داده شده است اما به دلیل اهمیت بیشتر این موضوع در بخش بهینه سازی ارائه شده است.

۴- نتایج تحلیل

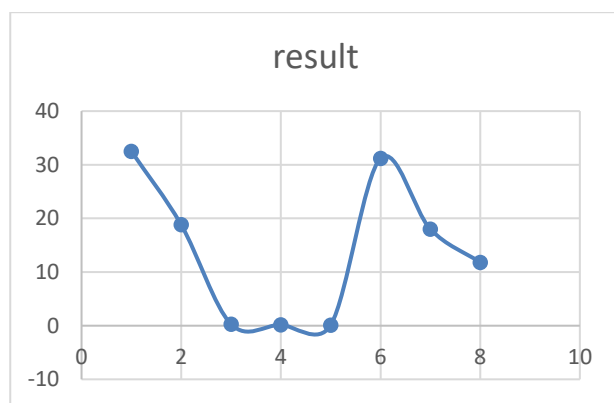
برای بررسی تاثیر ضخامت و جنس در لایه ها و هسته به طور مجزا ۹ آزمایش برای جنس و ۲ آزمایش برای ضخامت صورت گرفت که در ادامه به تفصیل ارایه شده است. در همه آزمایش ها بار ورودی ۱۷۰۰ نیوتن است.



۴-۱- تحلیل جنس با ضخامت ثابت

$$x=[3,1,0.0001,1,0.015,1,0.0001,1,0.0001]$$

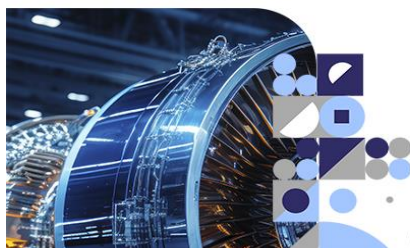
در مورد اول چینش متغیرهای به صورت بالا بود و به ترتیب جنس لایه ها از گرافیت اپوکسی، هسته فوم، ضخامت ها ۱ میلیمتر وضخامت هسته ۱۵ میلیمتر و تنش های حاصل شده $2.6021e+007$ ، $2.6021e+007$ ، $-1.9437e+007$ و بیشینه تنش $3.2479e+007$ است که از کامند ویندو متلب استخراج گردیده است. در ادامه هر بار با ثابت گرفتن یک دسته از متغیرها مثل ضخامت و هسته تغییر جنس لایه ها و در موارد دیگر با ثابت گرفتن هسته تاثیر تغییر جنس لایه ها را مورد واکاوی قرار داده ایم که نتایج تحلیل و بررسی در جدول ۷ و نمودار ۱ آورده شده است. همانطور که از نمودار ۱ نشان داده شده است از بین ۸ نمونه ساندویچ پانل با جنس های مختلف نمونه اول با 32.5 MPa و نمونه ششم با 31.2 MPa دارای بیشترین مقاومت خمشی هستند و نمونه های سوم تا پنجم کمترین بارخمشی را تحمل کرده اند. این تحقیق نشان میدهد که ساندویچ پانل با لایه های گرافیت اپوکسی با داشتن هسته فومی بیشترین مزیت را از نظر تحمل بار خمشی را ارایه میکند (نمونه شماره یک) و لایه ها با ساختار الومینیوم (نمونه شماره ۵) کمترین مزیت را در این رابطه دارد مشخصات متغیرهای نمونه ها به ظرفیت مقاومت خمشی آنها در جدول ۷ آورده شده است.



نمودار ۱- تحلیل انواع جنس لایه ها منطبق با جدول (افقی شماره آزمایش، عمودی تنش)

جدول ۷: نتایج تحلیل جنس

ردیف	متغیرهای طراحی سه تایی لایه ها	تنش بحرانی MPa
۱	$x=[3,1,0.0001,1,0.015,1,0.0001,1,0.0001]$ لایه ها از کامپوزیت گرافیت اپوکسی هسته فوم ضخامت ها ۱ میلیمتر ضخامت هسته ۱۵ میلیمتر	۳۲.۵
۲	$x=[3,2,0.0001,1,0.015,2,0.0001,2,0.0001]$ لایه ها از کامپوزیت شیشه اپوکسی هسته فوم ضخامت ها ۱ میلیمتر ضخامت هسته ۱۵ میلیمتر	۱۸.۸
۳	$x=[3,1,0.0001,2,0.015,1,0.0001,1,0.0001]$ لایه ها از کامپوزیت گرافیت اپوکسی هسته الومینیوم ضخامت ها ۱ میلیمتر ضخامت هسته ۱۵ میلیمتر	۰.۳



۴	$x=[3,2,0.0001,2,0.015,2,0.0001,2,0.0001]$ لایه ها شیشه اپوکسی هسته آلومینیوم ضخامت ها ۱ میلیمتر ضخامت هسته ۱۵ میلیمتر	۰.۱۷
۵	$x=[3,3,0.0001,2,0.015,3,0.0001,3,0.0001]$ لایه ها آلومینیوم هسته آلومینیوم ضخامت ها ۱ میلیمتر ضخامت هسته ۱۵ میلیمتر	۰.۱۱
۶	$x=[3,1,0.0001,3,0.015,1,0.0001,1,0.0001]$ لایه ها گرافیت اپوکسی هسته هانی کوم ضخامت ها ۱ میلیمتر ضخامت هسته ۱۵ میلیمتر	۳۱.۲
۷	$x=[3,2,0.0001,3,0.015,2,0.0001,2,0.0001]$ لایه ها شیشه اپوکسی هسته هانی کوم ضخامت ها ۱ میلیمتر ضخامت هسته ۱۵ میلیمتر	۱۸
۸	$x=[3,3,0.0001,3,0.015,3,0.0001,3,0.0001]$ لایه ها آلومینیوم هسته هانی کوم ضخامت ها ۱ میلیمتر ضخامت هسته ۱۵ میلیمتر	۱۱.۸
9	$x=[3,3,0.0001,1,0.015,3,0.0001,3,0.0001]$ لایه ها آلومینیوم هسته فوم ضخامت ها ۱ میلیمتر ضخامت هسته ۱۵ میلیمتر	۱۱.۱

۲-۴- تحلیل ضخامت

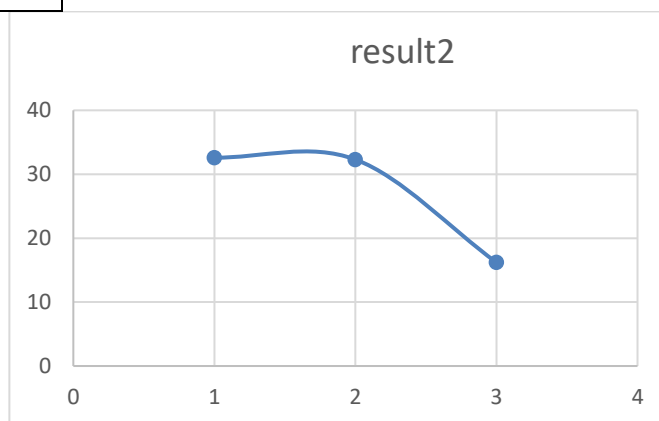
بهترین ساختار از جدول تحلیل جنس که همان نمونه اول است انتخاب شده است و تغییرات مورد نظر شامل افزایش ضخامت لایه ها و هسته و تاثیر آنها در حد نهایی تنش در خمش مشخص شده است. (جدول ۸ و نمودار ۲)

آزمایش نمونه شماره ۲ در جدول ۸ نشان میدهد که افزایش ضخامت لایه ها تاثیری در افزایش استحکام مجموعه ساندویچ پانل نداشته است و به علاوه در مورد آزمایش شماره سوم در جدول ۸ افزایش ارتفاع هسته با همان نسبت تحمل بار خمشی را کاهش میدهد. در همه تحلیل ها لایه دوم به دابخش مساوی بین لایه اول و سوم و در پایین و بالای هسته قرار گرفته است.

جدول ۸- نتایج تحلیل ضخامت



ردیف	متغیرهای طراحی سه تایی لایه ها و معرفی آنها	نتنش بحرانی MPa
۱	$x=[3,1,0.0001,1,0.015,1,0.0001,1,0.0001]$ لایه ها ساخته شده از کامپوزیت گرافیت اپوکسی هسته فوم ضخامت ها ۱ میلیمتر ضخامت هسته ۱۵ میلیمتر	۳۲.۶
۲	$x=[3,1,0.0002,1,0.015,1,0.0002,1,0.0002]$ ضخامت دوبرابر شد اما بار بحرانی افزایش نیافت	۳۲.۳
۳	$x=[3,1,0.0002,1,0.030,1,0.0002,1,0.0002]$ در حالت بهترین واریته با دوبرابر شدن ضخامت لایه ها اگر ضخامت هسته ۲ برابر شود بار بحرانی نصف میشود	۱۶.۲



نمودار ۲- تحلیل ضخامت ۲ نمونه بررسی شده

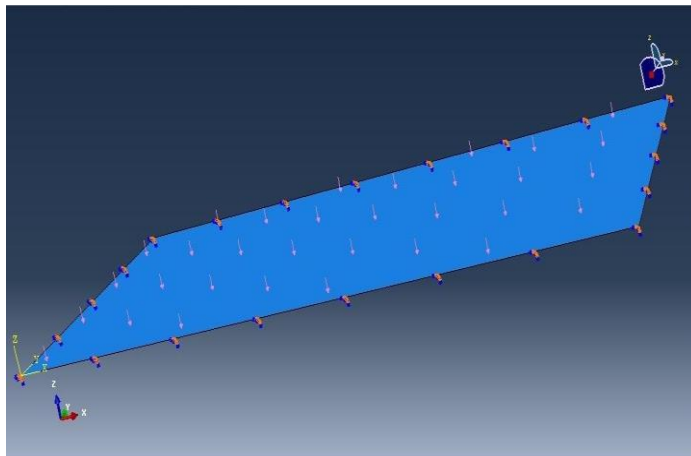
۵- تطبیق نتایج تحلیل متلب با تحلیل المان محدود آباکوس

برای اعتبار سنجی تحلیل ۵ از جدول ۷، از تحلیل المان محدود در نرم افزار آباکوس استفاده شده است و نمونه با ابعاد هندسی بخش ۱-۳ و با همان متغیرهای نمونه شماره ۵ مورد بررسی قرار گرفته است. این بار بدترین نمونه را برای تست آباکوس انتخاب کرده ایم که حداقل ایمنی را در روشن شدن بیشتر حد اختلاف داشته باشد.

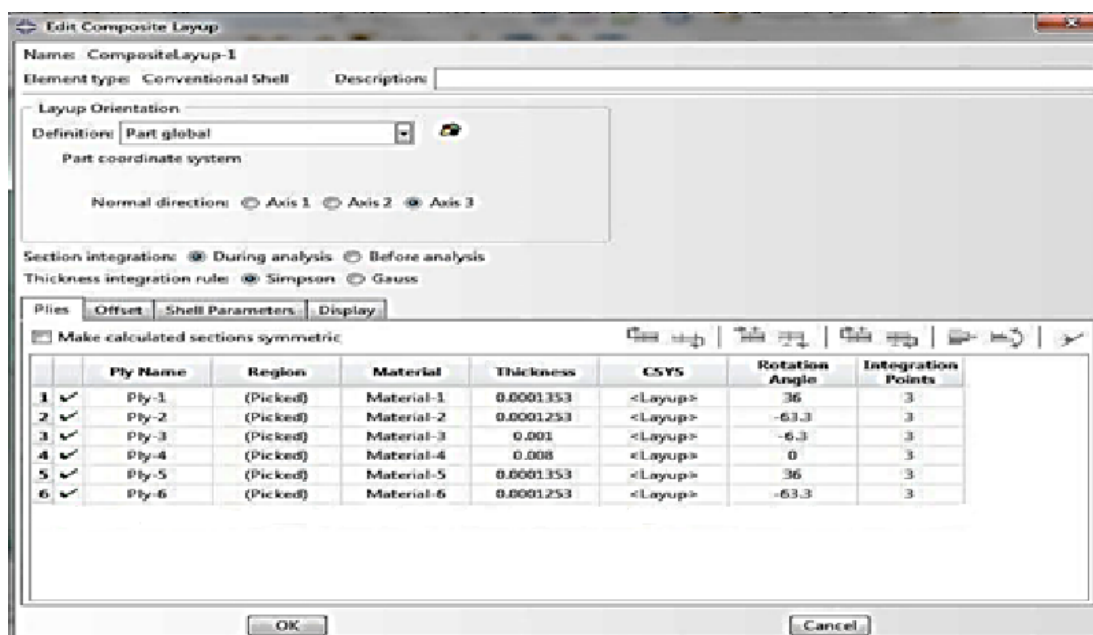
در این تست از نمونه با داشتن حد تحمل 0.11 MPa استفاده شده است در شکل های ۵ تا ۷ مراحل اصلی کار در نرم افزار و شیوه تحلیل تا رسیدن به بخش حل مساله شان داده شده است. تحلیل تنش برای بدست آوردن تنش های قائم و برشی در رویه وسط و زیر لایه ها انجام شده است. نتایج بررسی المان محدود نشان داد که اختلاف حدود ۱۵٪ به طور متوسط بین



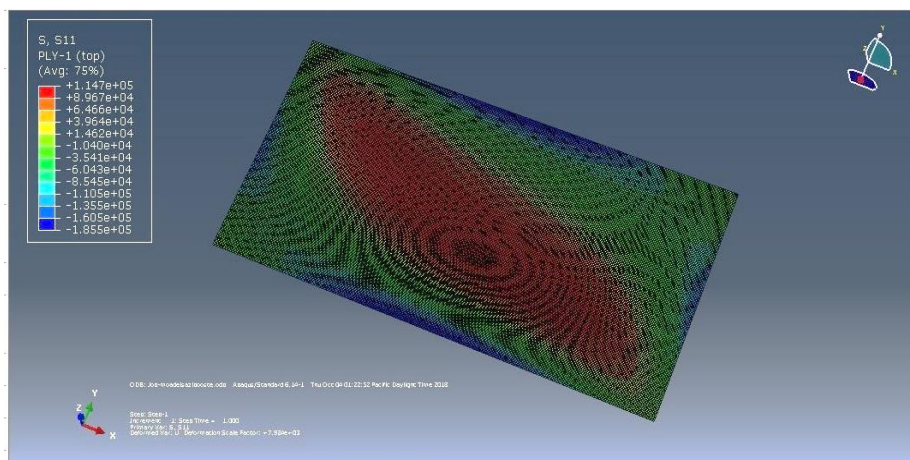
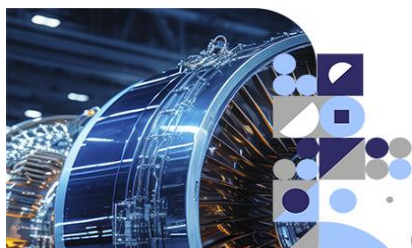
تحلیل ریاضی با تحلیل اجزا محدود وجود دارد که در جدول ۹ و نمودار ۳ آورده شده است.



شکل ۵: اعمال شرایط مرزی سازه ساندویچ پانل و اعمال تنش های توزیع شده بر سطح ورق



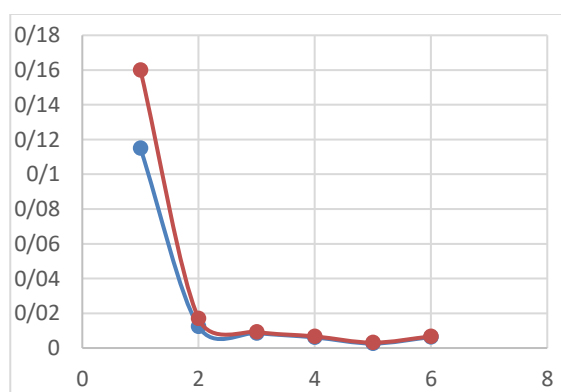
شکل ۶: اعمال خواص لایه ها و هسته، محل اعمال تنش، تعداد نقاط تنش، ضخامت لایه ها و زاویه الیاف



شکل 7: محاسبه تنش نهایی در رویه لایه اول

جدول 9: مقایسه نتایج تحلیل اجزا محدود آباکوس با نتایج تحلیل

ردیف	تقاطع مورد بررسی تنشهای قائم و برشی	نتایج تحلیل عددی MPa	نتایج تحلیل ریاضی متلب MPa	درصد خطا
۱	تنش σ_{xx} در لایه اول در نقطه ابتدای لایه	0.160	0.115	+29
۲	تنش σ_{yy} در لایه اول در نقطه ابتدای لایه	0.0170	0.0124	+27
۳	تنش σ_{xy} در لایه اول در نقطه ابتدای لایه	0.0093	0.0086	+8
۴	تنش σ_{xx} در لایه ۷ در نقطه وسط لایه	0.0067	0.0061	+9
۵	تنش σ_{yy} در لایه ۷ در نقطه وسط لایه	0.0031	0.0026	+17
۶	تنش σ_{xy} در لایه ۷ در نقطه وسط لایه	0.0067	0.0063	+7



نمودار ۳: اختلاف تنش بحرانی نمونه های تحلیل متلب با آباکوس

۶- بهینه سازی با روش الگوریتم ژنتیک تک هدفه



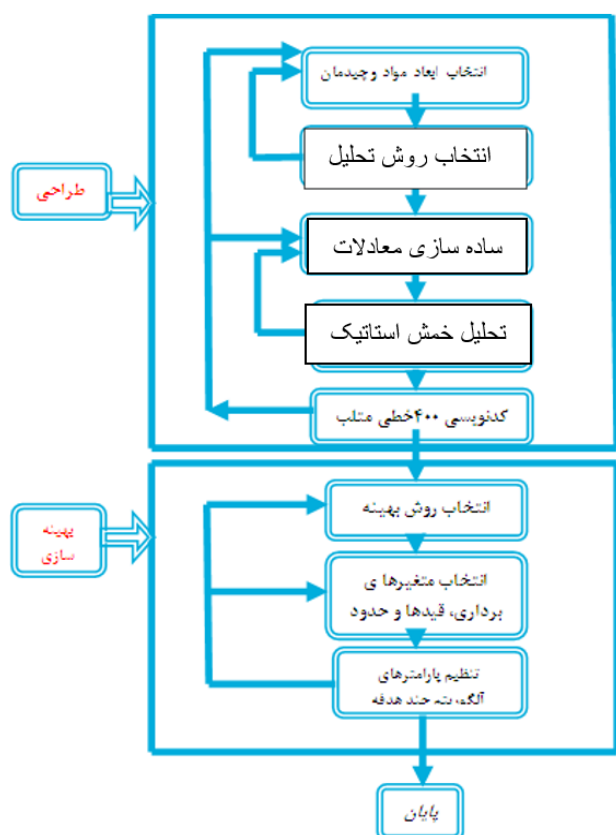
تحلیل ساندویچ پانل سه لایه ای شامل جنس لایه ها ، هسته و ضخامت ها در بخش قبل با ۹ آزمایش از تحلیل جنس و ۲ آزمایش از ضخامت انجام گرفت. در این بخش به دلیل وجود ضرورت در کمینه کردن وزن سازه ساندویچ پانل و به منظور بررسی انواع شرایط ترکیب متغیرها و نه فقط آن ۱۱ آزمایش به بهینه سازی تحلیل با بازه ای استاندارد از محدوده تغییرات متغیرهای قابل بررسی پرداخته شده است. این روش توسط الگوریتم ژنتیک که یک روش جمعیتی و قابل اتکا در بهینه سازی مسائل مهندسی است انجام گرفته است. قید استحکام که حد تسلیم را معین میکند نیز در برنامه نویسی متلب با الگوریتم ژنتیک مطابقت داده شده است و حد جریمه مناسبی را در اختیار گرفته است، در نتیجه تحلیل بهتری از بهینه سازی انجام خواهد شد.

۶-۱- روش بهینه سازی

برای بهینه سازی متغیرها و اهداف با بالا بودن تعداد متغیرهای مساله روبرو هستیم. به عنوان نمونه برای یک ورق ۵ لایه کامپوزیتی تعداد متغیرهای مساله 13 عدد است که با ضرب آنها در هرتعداد تکرار بهینه سازی، این تعداد متغیر چندین برابر خواهد شد، بنابراین ضرورت استفاده از یک روش جمعیتی دیده میشود. یکی از روشهایی که در سالهای اخیر کاربرد فراوانی در تحقیقات و پژوهش ها پیدا کرده است روش بهینه سازی الگوریتم ژنتیک است در این روش علاوه بر اطمینان از حصول پاسخهای بهینه هدف مساله که وزن میباشد را بهینه میگرددد. بنابراین در این تحقیق از روش بهینه سازی الگوریتم ژنتیک متلب استفاده شده است، البته مساله مورد تحلیل یک مساله تک هدفه میباشد، در بخش نتایج نشان داده میشود که پس از توقف دنباله تکرار ها بر اساس شاخص های اصلی در روش الگوریتم ژنتیک متغیرهای طراحی شامل خواص ساختاری ساندویچ پانل بهینه و در نهایت یک وزن بهینه را بدست داده است.

۶-۲- فرمولبندی مساله بهینه سازی

با بررسی انجام گرفته از انحرافات استاتیک تنش ها، فشار یا برش بر رویه های کامپوزیتی از ورق های مخصوص ارتوتروپیک استفاده شده است. در بخش تحلیل تا جایی که امکان داشت از روش حل دقیق استفاده شد در اینجا خم شدن استاتیک ورق در غیاب اثرات حرارتی در ورق در نظر گرفته شده است.



تحلیل خمش ساندویچ پنل برای گروهای سه لایه ای موجود در بخش تحلیل تحقیق با اضافه کردن بازه های استاندارد متغیرها یا همان قیود طراحی تحت بارگذاری یکنواخت قائم ۱۷۰۰ نیوتن با فرض شرایط مرزی با ساپورت های ساده مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق، هدف بهینه سازی وزن یک ساندویچ پانل با لایه های گرافیت اپوکسی، شیشه اپوکسی و آلومینیوم و هسته از جنس های فوم، آلومینیوم ولانه زنبوری است. اهداف بهینه شامل وزن های کمینه با قید استحکام شکست لایه ها می باشد. در محاسبه وزن از روابط محاسبات چگالی لایه ها استفاده شده است و برای قید استحکام از معیار تسلیم تسای هیل بهره گرفته شد (فلوچارت ۱)

تنظیمات صفحه نوار ابزار الگوریتم ژنتیک نرم افزار مطلب در شکل ۸ آمده است.

فلوچارت ۱: الگوریتم روش تحلیل و بهینه سازی

الف-تابع هدف: بهینه سازی وزن لایه ها و وزن هسته هدف است:

$$F(x) = M_{\text{layers}} + M_{\text{core}}$$

ب-متغیرهای طراحی: متغیرهای مساله به شکل زیر تعریف شده است.

$$\vec{x} = [3, \text{matL}_1, \text{thL}_1, \text{matC}_1, \text{thC}, \text{matL}_2, \text{thL}_2, \text{matL}_3, \text{thL}_3]$$

ج-محدوده تغییرات: حدود متغیرهای طراحی شامل حدود پایین و بالای لایه ها و هسته در جدول ۱۰ آورده شده است. حدود مشخص شده در یک بازه استاندارد قرار گرفته اند و بهینه ساز متلب مجاز است هر عددی بین آن محدودها را اختیار کند تا در تکرارهای بعدی دسته اعداد بهینه تری را حاصل نماید. برای مواد لایه ها و هسته حد بالا ۴ انتخاب گردیده است و فاصله بین ۳ و ۴ به عدد پایین گرد میشود.



Problem Setup and Results		Options	
Solver: ga - Genetic Algorithm		☐ Population	
Problem Fitness function: sandwichbendingnamotegharen5		Population type: Double vector	
Number of variables: 17		Population size: ☐ Use default: 20	
Constraints: Linear inequalities: A: b:		☒ Specify: 50	
Linear equalities: Aeq: beq:		Creation function: Constraint dependent	
Bounds: Lower: [5,1,1,0.0001,1,1] Upper: [5,4,4,0.0003,4,4]		Initial population: ☒ Use default: []	
Nonlinear constraint function:		☐ Specify:	
Run solver and view results ☐ Use random states from previous run		Initial scores: ☒ Use default: []	
Start Pause Stop		☐ Specify:	
Current iteration: Clear Results		Initial range: ☒ Use default: [0;1]	
		☐ Specify:	
		Fitness scaling	



شکل 8: optim tool تنظیمات اصلی

جدول ۱۰- محدوده متغیرهای طراحی

متغیرها	حد بالا	حد پایین
جنس لایه اول	۴	1
ضخامت لایه اول	۰.۰۰۳	۰.۰۰۰۱
جنس هسته	۴	۱
ضخامت هسته	۰.۰۲۵۴	۰.۰۰۶۲۵
جنس لایه دوم	۴	۱
ضخامت لایه دوم	۰.۰۰۳	۰.۰۰۰۱
جنس لایه سوم	۴	۱
ضخامت لایه سوم	۰.۰۰۳	۰.۰۰۰۱

د- معیار شکست تک لایه ها و کل سازه : قید حداکثر تنش شکست در لایه ها با استفاده از معیار تی سای هیل (معادله ۷) [12] در متلب کدنویسی گردید، بدین صورت که پس از محاسبه تنش های تک لایه ها با استفاده از مدول های تغییر یافته تنش در نقاط ابتدا وسط و انتهای هر لایه محاسبه گردید. بر طبق معیار شکست تی سای هیل یک لایه اورتوتروپیک تحت حالت تنش عمومی به صورت نسبت تنش اعمال شده به تنش های تسلیم لایه ها تعریف میشود.

$$\left[\frac{\sigma_1}{(\sigma_1^T)_{ult}} \right]^2 - \left[\frac{\sigma_1 \sigma_2}{(\sigma_1^T)_{ult}^2} \right] + \left[\frac{\sigma_2}{(\sigma_2^T)_{ult}} \right]^2 + \left[\frac{\tau_{12}}{(\tau_{12})_{ult}} \right]^2 < 1.$$

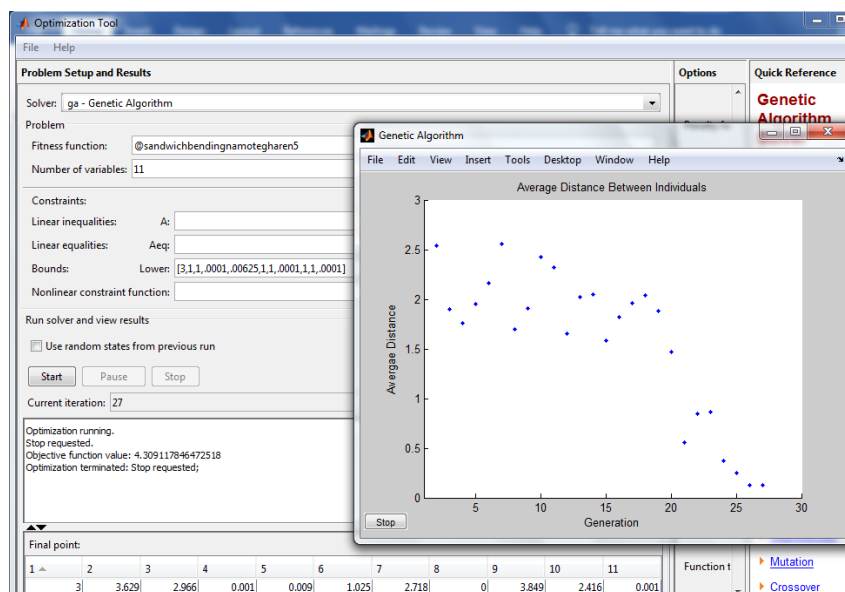
(۷)

۷- نتایج بهینه سازی

بهینه ساز تک هدفه الگوریتم ژنتیک در هر تکرار متغیرهایی بهتر از تکرار قبل را ایجاد مینماید و در نهایت به یک دسته متغیرهای بهینه خواهد رسید که نقطه یوتوپیا نام گرفته است این نقطه فضایی را ترسیم میکند که در آن کوچکترین اختلاف حدی بین تولیدات جدید با تولیدات قبلی است و اختلاف به دلیل کوچکی زیاد توسط الگوریتم جریمه و روند بهینه سازی متوقف خواهد شد. [13]

در نهایت متغیرهای بهینه شده که شامل جنس و ضخامت هر لایه و جنس و ضخامت ضخیم هسته میباشد، نرم افزار یک شاخص بهینه از وزن نمونه مورد بررسی را به ثبت میرساند ورودی های ابعادی و فشار اعمال شده برای یک ساندویچ پانل سه لایه همانند بخش تحلیل است در ساندویچ پانل سه لایه پاسخ نهایی متغیرهای بهینه شده در ادامه شرح داده شده است.

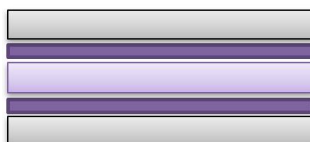
همانطور که در نمودار شکل ۸ قابل مشاهده است بهینه سازی پس از ۲۷ تکرار متوقف شده است و مقادیر تولیدات با حداقل اختلاف بین تولیدات به پایان رسیده است، مقدار هدف بهینه سازی به عنوان ارزش تابع هدف در سمت چپ شکل ۸ دیده میشود که مقدار وزن بهینه میباشد و مقدار آن ۴.۳ کیلوگرم است مقدار بار بحرانی یا حد نهایی مقاومت تنش خمشی نیز از کامند ویندوز متلب قابل استخراج است که ۲۰ MPa است و از حداکثر نمونه بهتر بخش تحلیل که ۳۲.۵ مگا پاسکال بود 38% کمتر است. مقادیر متغیرهای ساندویچ پانل نیز در خط آخر پنجره بهینه سازی قابل مشاهده است.



شکل ۹: پاسخ های بهینه و هدف نهایی

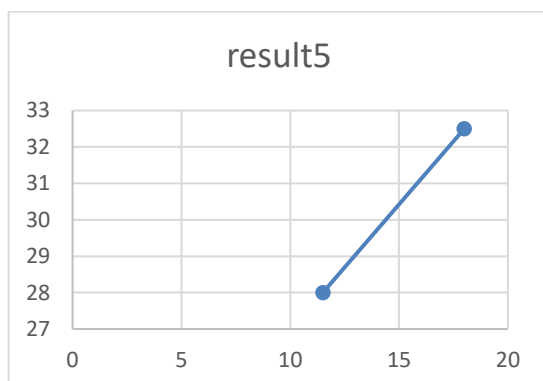
۷-۱- پاسخ های پارامترهای بهینه شده

اعداد بخش فاینال پوینت در سمت چپ و پایین شکل ۹ شاخص های متغیرهای بهینه شده بر اساس تعیین هر متغیر به ثبت رسیده است. لایه اول دارای جنس آلومینیوم میباشد در لایه دوم جنس از کامپوزیت گرافیت اپوکسی و همچنین جنس لایه سوم آلومینیوم است، جنس هسته نیز از فوم پلی اورتان است. این موضوع در شکل ۱۰ به وضوح قابل نمایش است و ترتیب لایه ها از پایین به بالاست و قاعدتا چون تعداد لایه ها فرد است هسته بین لایه دوم قرار میگیرد و لایه دوم به دو نیم تقسیم میگردد.



شکل ۱۰: چیدمان بهینه شده نهایی

اعداد بهینه نهایی نشان داده است که ضخامت های لایه ها به ترتیب از لایه اول ۱ mm هسته ۹ mm و ضخامت لایه دوم ۰.۱ mm و ضخامت لایه آخر ۱.۵ mm که مجموع ضخامت کل ۱۱.۶ mm حاصل میشود. برای بهترین وارسته از بخش تحلیل شماره ۱ از جدول ۷ دارای ضخامت کل ۱۸ mm بود بنابراین ۵۵٪ بهبود در کاهش ضخامت حاصل شده است.



نمودار ۴-محور افقی ضخامتها و نمودار عمودی بار بحرانی مقایسه بخش های تحلیل و بهینه سازی

8-نتیجه گیری

- ۱-در تحلیل ساندویچ پانل، لایه ها با کامپوزیت گرافیت اپوکسی و شیشه اپوکسی وبا داشتن هسته های فومی بیشترین افزایش مقاومت خمشی را به نسبت نمونه های آلومینیومی نشان داد.
- ۲-در بهترین نمونه افزایش ضخامت لایه ها تاثیری در بار بحرانی خمشی نداشت و افزایش ارتفاع هسته به همان نسبت مقاومت خمشی را کاهش داد.
- ۳-اعتبار سنجی بدترین نمونه آزمایش تحلیل در مقایسه با تحلیل المان محدود اختلاف حدود ۱۵٪ را نشان داد.
- ۴-در بهینه سازی ساندویچ پانل چینش لایه ها از لایه های بیرونی آلومینیوم و لایه های درونی گرافیت اپوکسی تشکیل شد و هسته نیز با فوم پلی اورتان طراحی شد.
- ۵-بهینه سازی در مقایسه با بخش تحلیل ۵۵٪ کاهش در ضخامت سازه ساندویچ پانل را حاصل کرد اما مقاومت خمشی ۳۸٪ کاهش یافت.
- ۶-شاخص وزن بهینه که هدف طراحی بهینه سازی تحقیق بود وزن کل ۴.۳ کیلوگرم را نشان داد

۹-مراجع

- [1] Bitzer TN. Honeycomb technology: materials, design, manufacturing, applications and testing. Springer Science & Business Media; 1997.
- [2] <https://topolo-panel.com/aluminum-pu-sandwich-panels/>
- [3] Vakilifard A, Mazaheri H, Shaban M. Bending behavior and geometrical optimization of five-layered corrugated sandwich panels with equal in-plane principal stiffness. Journal of Composite Materials. 2022;56(17):2739-53.
- [4] Habibnia M, Ghasemi Tamami P, Sang Davini H. Design and investigation of honeycomb end plates for PEM fuel cells. Iranian Journal of Hydrogen & Fuel Cell. 2018;4(3):189-99.
- [5] Wang L, Liu W, Wan L, Fang H, Hui D. Mechanical performance of foam-filled lattice composite panels



in four-point bending: Experimental investigation and analytical modeling. Composites part b: engineering. 2014;67:270-9.

[6] Sun G, Huo X, Chen D, Li Q. Experimental and numerical study on honeycomb sandwich panels under bending and in-panel compression. Materials & Design. 2017;133:154-68.

[7] Wang J, Shi C, Yang N, Sun H, Liu Y, Song B. Strength, stiffness, and panel peeling strength of carbon fiber-reinforced composite sandwich structures with aluminum honeycomb cores for vehicle body. Composite Structures. 2018;184:1189-96.

[8] Daliri V, Zeinedini A. Flexural behaviour of the composite sandwich panels with novel and regular corrugated cores. Applied Composite Materials. 2019;26(3):963-82.

[9] Nasiri S, Sadegh-Yazdi M, Mostofi TM, Mousavi SM, Ziya-Shamami M. optimization of effective parameters in free iron sheet forming process by underwater explosion method. Journal of Aerospace Mechanics. 2022;18(3):87-108

[10] Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells Theory and Analysis, Second Edition, N. Reddy, 5, Analysis of Specially Orthotropic Laminates Using CLPT (245-251).

[11] Bending, Vibration and Buckling of Laminated Composite Plates Using a Simple Four Variable Plate Theory, Atteshamuddin S. Sayyad ,Department of Civil Engineering, SRES's College of Engineering, Savitribai Phule Pune University, Kopargaon-423601, M.S., India.

[12] Autar K. Kaw, Mechanic of Composite Materials, second edition, Taylor & Francis Group, Published in 2006 by CRC Press 6000 Broken Sound Parkway NW, 106-327.

[13] Konak, A., Coit, D.W. and Smith, A.E., 2006. Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial. Reliability engineering & system safety, 91(9), pp.992-1007.