

تحلیل و بهینه‌سازی سازه‌های ساندویچی با هسته سینوسی

محمد کاظم بشارتی گیوی^۱، مهدی قاسمی^۲ و سید محمود موسوی مشهدی^۳

^۱ دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

^۲ دانش آموخته کارشناسی ارشد مکانیک ساخت و تولید - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

^۳ استاد دانشکده مهندسی مکانیک - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۵/۱۰/۲۴، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۷/۱۰/۱۲، تاریخ تصویب ۸۷/۱۲/۱۸)

چکیده

در این مقاله به بررسی نوع خاصی از پانل‌های ساندویچی با هسته سینوسی پرداخته شده است که در آن بار به صورت گسترده به صفحات بالایی و پایینی اعمال می‌شود، ابتدا با رسم نمودارهای آزاد و روش انرژی و تئوری کاستیگیلیانو نیروها و ممان‌ها در هسته به تشکیل گردیده و سپس از روی این معادلات تنش‌ها و تغییر مکان‌های عمودی و افقی در اثر بار وارده به دست آمده‌اند، به منظور بررسی صحت نتایج تحلیلی، جواب‌ها با نرم افزار ANSYS مقایسه شده‌اند. با در نظر گرفتن قید مکان برای پانل ساندویچی، بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک و جعبه ابزار MOEA در محیط MATLAB انجام شده و در انتها جواب‌های حاصل از بهینه‌سازی با هم مقایسه گردیده‌اند. در این تحقیق برنامه مدلی در نرم افزار MATLAB به صورت m-file تهیه شده است که در آن کاربر می‌تواند مشخصات پانل مورد نظر خود را از قبیل جنس و محدوده هرکدام از مشخصه‌ها را در فایل وارد کرده سپس با استفاده از جعبه ابزار MOEA جواب‌های بهینه را ملاحظه نماید، سپس با اجرای دستورات APDL داده شده در محیط ANSYS و وارد کردن مشخصه‌های بهینه جواب‌های حاصل از تحلیل را مشاهده نماید که این امر می‌تواند کمک بسیار خوبی برای سازندگان این پانل‌ها باشد.

واژه‌های کلیدی: سازه‌های ساندویچی، ANSYS، MATLAB، MOEA، الگوریتم ژنتیک

مقدمه

دیگر به جای چسب از جوش یا لحیم استفاده می‌شود که این امر می‌تواند این نوع سازه‌ها را برای استفاده در شرایط سخت مانند درجه حرارت‌های بالا و یا محیط‌های مرطوب مناسب نماید. این نوع پانل‌ها که از پنج جزء تشکیل شده که تمامی لایه‌ها از فلز می‌باشد. مزایای این نوع جدید از پانل‌های ساندویچی را می‌توان در موارد زیر خلاصه نمود: جنس سادگی ساخت، مقاومت بالا در برابر بارهای وارده، کاهش قیمت تمام شده، امکان استفاده از دو نوع فلز متفاوت که یکی دارای مقاومت در برابر خوردگی مطلوب بوده و دیگری استحکام بالایی داشته باشد، عایق صوتی و حرارتی خوب و استفاده از جوش و یا لحیم به جای چسب که مانع از جدایش لایه‌ها می‌شود.

دلیل در نظر گرفتن شکل سینوسی برای هسته سهولت تغییر شکل ورق‌های فلزی به این شکل می‌باشد که به آسانی با یک نورد ساده قابل انجام است.

تحلیل مدل

پانل ساندویچی مورد بحث یک پانل ساندویچی تمام

پیشرفت‌های آینده در حوزه مهندسی مکانیک، خودروسازی و انرژی باید به سمت و سویی حرکت کند که در آن فرآیندها، ابزار آلات و مواد به نحوی منابع طبیعی و انرژی ما را حفظ کرده و در عین حال از لحاظ فناوری نیز نیازهای ما را برآورده سازد. امروزه استفاده از سازه‌های سبک به عنوان یک راه کار مناسب جهت کاهش هزینه‌ها، افزایش عمر محصولات و نیز استفاده بهینه از منابع توجه بسیاری را به خود جلب کرده است.

بنا به تعریف سازه‌های ساندویچی عبارتند از سازه‌های کامپوزیتی که در ساخت آنها برحسب مورد از یک ماده و یا مواد مختلف با شکل‌های مختلف استفاده می‌گردد به نحوی که دارای وزن کم، مقاومت بالا و خواص دینامیکی خوب باشند.

در این مقاله به بررسی نوع خاصی از سازه‌های ساندویچی پرداخته شده که الهام اولیه آنها با مشاهده کارتن‌های مقوایی به ذهن انسان متبادر می‌گردد با این تفاوت که در ساخت آنها از فلزات معمول یعنی فولاد و آلومینیوم استفاده شده است و برای اتصال آنها به یک

۴. q : بار گسترده وارده به لایه های بالایی و پایینی
 ۵. N : نیروی محوری در نقطه ای به فاصله x از مبدا مختصات در نظر گرفته شده، می باشد
 ۶. V : نیروی برشی در نقطه ای به فاصله x از مبدا مختصات در نظر گرفته شده
 اما در معادلات مذکور نیروی محوری F مجهول می باشد که برای به دست آوردن آن لازم است که ابتدا انرژی کرنشی هسته محاسبه شود:

$$U = \int_0^s \left(\frac{\delta M^2}{2} + \frac{\alpha N^2}{2} + \frac{\beta V^2}{2} \right) ds$$

$$\delta = \frac{12}{E_2 t_2^3} \quad \alpha = \frac{1}{E_2 t_2} \quad \beta = \frac{1}{k G_2 t_2}$$

(۷)

که در آن U انرژی کرنشی یک چهارم هسته می باشد. طبق تئوری کاستیگیلیانو یلیانو داریم [۱-۳]:

$$\Delta x = \frac{\partial U}{\partial F} \quad (۸)$$

از طرفی جا به جایی یک تیر به طول L در اثر نیروی F از رابطه زیر به دست می آید:

$$\delta = \frac{FL}{EA} \quad (۹)$$

با مساوی قرار دادن جا به جایی افقی هسته سینوسی و لایه میانی مسطح رابطه زیر به دست می آید:

$$\Delta x_{x=0} = \frac{\partial U}{\partial F_{x=0}} = \frac{F \frac{L}{E_1 t_1}}{2}$$

$$\rightarrow 2 \frac{\partial U}{\partial F_{x=0}} = \frac{FL}{E_1 t_1} \quad (۱۰)$$

با حل معادله (۱۰) نیروی F محاسبه می گردد. برای حل معادله فوق روش های متعددی وجود دارد، روشی که در این جا استفاده شده است روش عددی گوس می باشد که به منظور دست یابی جواب های دقیق تر از روش گوس ۱۰ نقطه استفاده شده است. پس از حل انتگرال فوق، و مشتق گیری و حل معادله مذکور در نرم افزار MAPLE مقدار F به دست آمده است، با جاگذاری F در معادلات داده شده، معادله ممان خمشی، نیروی محوری و نیروی برشی در هسته سینوسی به دست می آید که به دلیل طولانی بودن معادلات از آوردن آنها خودداری شده است.

فلزی با هسته سینوسی می باشد، در این نمونه نیز مانند پانل های ساندویچی متداول دو صفحه روکش نازک از جنس فولاد و یا آلومینیوم وجود دارد و هسته آن به شکل سینوسی به صورت شکل (۱) می باشد. برای تحلیل یک سلول از پانل فوق در نظر گرفته شده است. معادله پانل به صورت زیر می باشد [۱-۳]:

$$y = h \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi x}{L}\right) \right) \quad (۱)$$

شکل (۲) یک سلول از پانل فوق را نشان می دهد، که در آن بار مطابق شکل (۳) به صورت گسترده به لایه های بالایی و پایینی اعمال شده است.

در شکل های (۱) و (۲) پارامترها عبارتند از:

۱. t_1 : ضخامت لایه مسطح میانی

۲. t_2 : ضخامت لایه های سینوسی شکل

۳. h : دامنه تابع سینوسی

۴. H : ضخامت کل پانل که برابر است با

$$H = 4h + 2t_1 + 2t_2 \quad (۲)$$

۵. L : طول یک سلول سینوسی

۶. x : متغیر $0 \leq x \leq L$

با رسم نمودار نیروها در هسته مطابق شکل (۴) و بررسی یک المان مطابق شکل (۵) و اصل تعادل نیروها روابط زیر حاصل می شود:

$$M = -Fh \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi x}{L}\right) \right) + \frac{qL}{2} x + M_0 \quad (۳)$$

$$M_0 = Fh - \frac{qL^2}{8} \quad (۴)$$

$$N = - \frac{\pi h \sin\left(\frac{2\pi x}{L}\right) q + F}{\sqrt{1 + \frac{\pi^2 h^2}{L^2} \sin^2\left(\frac{2\pi x}{L}\right)}} \quad (۵)$$

$$V = - \frac{\frac{qL}{2} - \frac{2\pi h}{L} \sin\left(\frac{2\pi x}{L}\right) F}{\sqrt{1 + \frac{\pi^2 h^2}{L^2} \sin^2\left(\frac{2\pi x}{L}\right)}} \quad (۶)$$

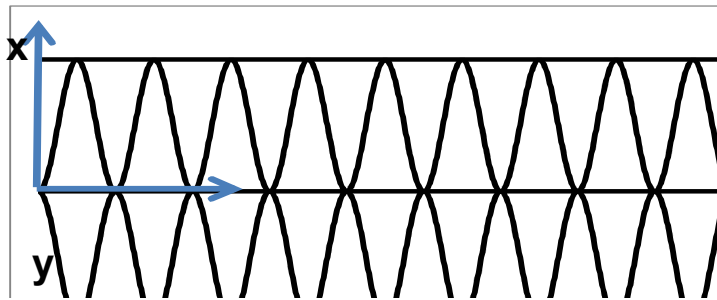
که در آنها:

۱. M : گشتاور خمشی در نقطه ای به فاصله x از مبدا

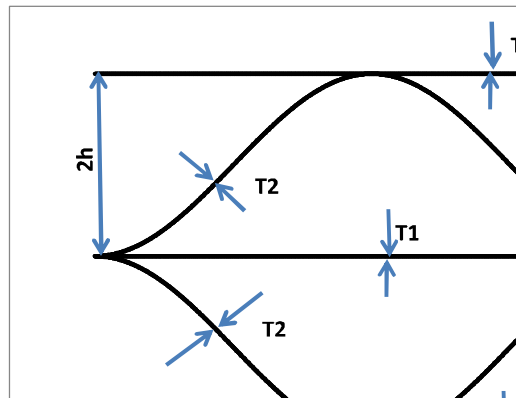
مختصات در نظر گرفته شده

۲. M_0 : گشتاور خمشی در مبدا مختصات

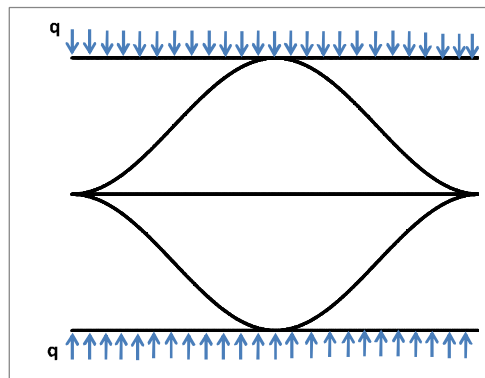
۳. F : نیروی محوری در مبدا مختصات



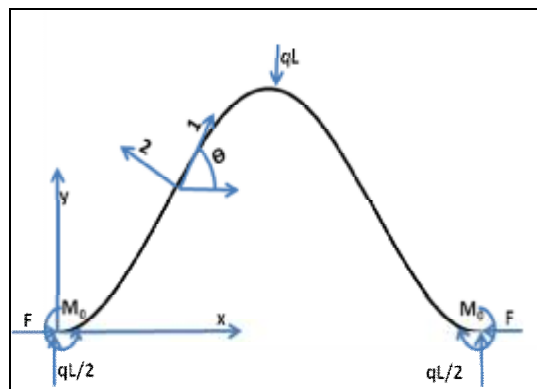
شکل ۱: نمونه پانل ساندویچی با هسته سینوسی.



شکل ۲: یک سلول از پانل ساندویچی با هسته سینوسی.



شکل ۳: نحوه اعمال بار روی یک سلول از پانل ساندویچی با هسته سینوسی.



شکل ۴: دیاگرام آزاد نیروهای اعمالی روی یک سلول از پانل ساندویچی با هسته سینوسی.

تغییر مکان های عمودی و افقی نیز با استفاده از

تئوری کاستیگیلیانو یلیانو به دست آمد. [۴]

$$\Delta x = \frac{\partial U}{\partial F} = \frac{FL}{2E_1 t_1} \quad (17)$$

$$\Delta y = \frac{\partial U}{\partial \left(\frac{qL}{2}\right)} = 2 \frac{\partial U}{\partial (qL)} \quad (18)$$

به منظور اطمینان از درستی جواب های به دست آمده در قسمت قبل یک مدل توسط نرم افزار ANSYS VER10 [۵]، در محیط APDL یا همان محیط برنامه نویسی ANSYS نوشته شد که می توان در هر مرحله مقادیر پانل ساندویچی را در آن وارد کرد و سپس نرم افزار مدل را با توجه به اعداد داده شده، ساخته و آن را تحلیل نمود.

مقایسه نتایج تحلیلی و المان محدود

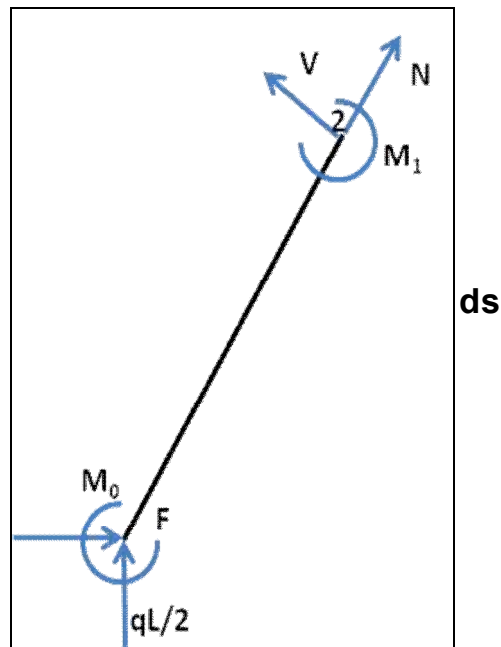
در این مقاله به صورت تصادفی تعدادی پانل ساندویچی با مشخصه های مختلف از دو روش تحلیلی و المان محدود مورد تحلیل قرار گرفته و مقادیر تغییر شکل در دو راستای x و y آنها در شکل های (۶) و (۷) با هم مقایسه شده اند. همان گونه که از شکل ها بر می آید جواب های تحلیلی و جواب های المان محدود با تقریب خوبی به یک دیگر نزدیک می باشند. در جدول (۲) به ازای یک پانل با تعداد سلول های متفاوت تحلیل در ANSYS انجام گردیده و نشان داده شده است که تعداد سلول ها تأثیر زیادی در جواب های نهایی نداشته است.

در قسمت بعدی برای ۱۵ نمونه تصادفی جدول (۱) مقادیر بار نهایی به نحوی به دست آمده است که تنش فون میز در پانل به حد تسلیم ماده مورد نظر برسد. در

نقطه ای با نسبت $I = \frac{\Delta y_{\max}}{H}$ در بار نهایی به دست آمده

است که شکل این نسبت را برای بارهای مختلف نشان می دهد. همان گونه که در شکل نیز نشان داده شده است مقدار I زمانی که پانل در آستانه تسلیم است تقریباً مقدار ثابت و عددی بزرگ تر از 1×10^{-5} بنابر این می توان قید تغییر مکان را به این صورت تعریف کرد که همواره نسبت I کوچک تر از 1×10^{-5} باشد، با در نظر گرفتن ضریب

اطمینان، مقدار $I = \frac{\Delta y_{\max}}{H} < 1 \times 10^{-6}$ به عنوان قید بهینه سازی در نظر گرفته شده است.



شکل ۵: نیروهای وارد بر یک المان.

با در نظر گرفتن روابط تیر های خمیده و استفاده از اصل جمع آثار تنش ها در هسته به صورت زیر به دست می آید [۴]:

$$\sigma_1 = \frac{N}{t_2} - \frac{My}{t_2 e(y - r_n)} \quad (11)$$

$$\sigma_{12} = \frac{V}{t_2} \quad (12)$$

که در معادلات بالا شعاع انحنای هسته با استفاده از رابطه زیر تعیین می گردد [۳-۴]:

$$r_n = \frac{t_2}{R + \frac{t_2}{2} \ln\left(\frac{R + \frac{t_2}{2}}{R - \frac{t_2}{2}}\right)} \quad (13)$$

$$R = \frac{\left(1 + \left(\frac{2\pi h}{L} \sin\left(\frac{2\pi x}{L}\right)\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}}{4\pi^2 h \cos\left(\frac{2\pi x}{L}\right)} \quad (14)$$

$$e = r_c - r_n = R - r_n \quad (15)$$

$$y = r_n - r = R - r_n \quad (16)$$

با جاگذاری روابط ۱۲ تا ۱۵ در روابط ۱۰ و ۱۱ و به دست آوردن تنش فون میز در هر x، شکست در هسته پیش بینی گردید. [۴]:

دانشگاه بین المللی سنگاپور جهت حل مسائل یک هدفه و چند هدفه طراحی گردیده، استفاده کرده ایم. ابتدا مدلی از سیستم به صورت m.file در نرم افزار MATLAB [۱۱] تهیه شده، سپس با استفاده از جعبه ابزار MOEA [۱۲] جواب های بهینه به صورت زیر به دست آمده است. در این جا هدف حداقل کردن حجم پانل ساندویچی در واحد طول می باشد که آن را با مشخصه VPL به صورت زیر نشان می دهیم.

$$VPL = \frac{2L_2t_2 + 2Lt_1}{L} \quad (19)$$

که در آن L_2 طول منحنی سینوسی در یک سلول می باشد که از رابطه زیر به دست می آید [۱۳]:

$$L_2 = \int_a^b \sqrt{1+y^2} dx \quad (20)$$

با جاگذاری رابطه ۱ در رابطه ۲۰ رابطه زیر به دست آید:

$$L_2 = \int_0^L \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi h}{L} \sin\left(\frac{2\pi x}{L}\right)\right)^2} dx \quad (21)$$

در ادامه بهینه سازی در چهار مرحله انجام شد.

در مرحله اول بهینه سازی فرض بر آنست که یک ورق خاص با ضخامت معین در دسترس بوده و منظور به دست آوردن مقادیر بهینه برای L می باشد. در تمامی حالات مورد بررسی ثوابت زیر در نظر گرفته شده است:

$$\begin{aligned} \frac{N}{m} & 20000 < q < 200000 \\ E_{Steel} & = 207 \times 10^9 \text{ pa} \\ E_{Aluminum} & = 70 \times 10^9 \text{ pa} \\ G_{Steel} & = 84 \times 10^9 \text{ pa} \\ G_{Aluminum} & = 28 \times 10^9 \text{ pa} \\ k & = \frac{5}{6} \\ Steps & = 20000 \end{aligned} \quad (22)$$

۱- بهینه سازی برای پانلی با مشخصات زیر از جنس فولاد انجام شد.

$$\begin{aligned} E_1 & = E_2 = E_{Steel} \\ G & = G_{Steel} \\ t_1 & = t_2 = 0.001m \\ h & = 0.002m \end{aligned} \quad (23)$$

جدول ۱: ۱۵ نمونه تصادفی پانل ساندویچی با مشخصه های مختلف از دو روش تحلیلی و المان محدود مورد تحلیل قرار گرفته و مقادیر تغییر شکل در دو راستای x و y آنها با هم مقایسه شده اند.

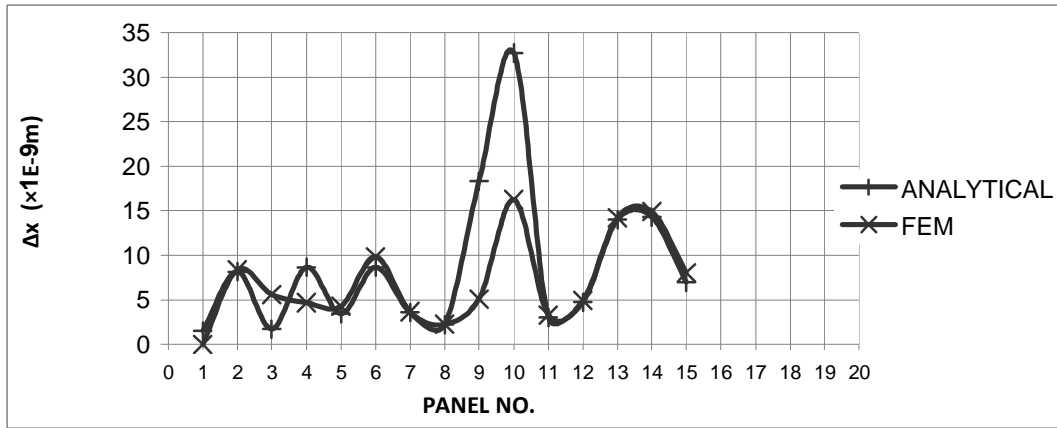
NO.	t_1 (m)	t_2 (m)	h (m)	L (m)	$q\left(\frac{N}{m}\right)$
1	0.0002	0.0005	0.002	0.01	1300
2	0.0001	0.0004	0.0035	0.015	1800
3	0.0001	0.0024	0.0034	0.0124	4000
4	0.0002	0.0005	0.005	0.01	10000
5	0.00014	0.00087	0.0027	0.0098	3450
6	0.001	0.0012	0.0062	0.014	4600
7	0.00022	0.00059	0.004	0.015	2000
8	0.00035	0.00092	0.0042	0.0095	8350
9	0.00034	0.00022	0.002	0.01	7200
10	0.00014	0.00034	0.0044	0.024	1500
11	0.001	0.00056	0.0026	0.008	2600
12	0.00026	0.00076	0.0033	0.0097	9800
13	0.0003	0.0005	0.003	0.02	3300
14	0.00016	0.00058	0.0035	0.018	2950
15	0.00017	0.00099	0.004	0.019	1600

جدول ۲: به ازای یک پانل با تعداد سلول های متفاوت تحلیل در ANSYS انجام شده.

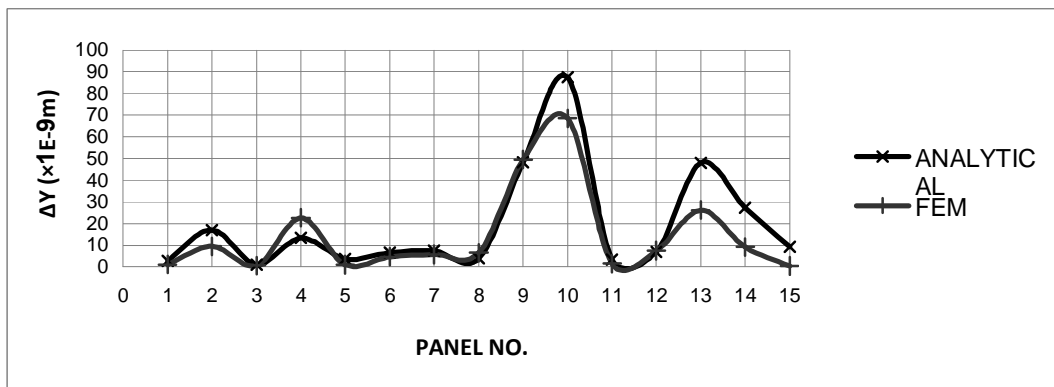
تعداد تکرار	Δy
2	1.36×10^{-9}
3	1.35×10^{-9}
4	1.35×10^{-9}
5	1.35×10^{-9}
6	1.35×10^{-9}
7	1.35×10^{-9}
8	1.35×10^{-9}
9	1.35×10^{-9}
10	1.35×10^{-9}

بهینه سازی

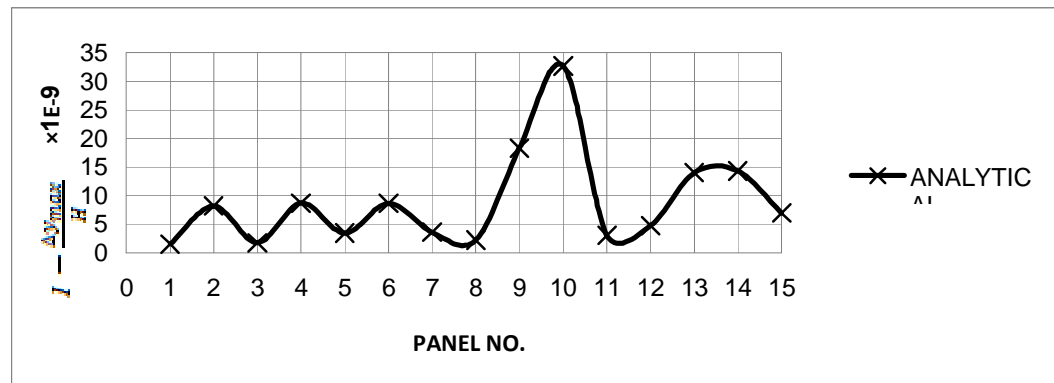
این قسمت از الگوریتم ژنتیک [۹-۶] به عنوان یک روش شناخته شده برای بهینه سازی استفاده شده است. جهت بهینه سازی از جعبه ابزار MOEA [۱۰] که در



شکل ۶: مقایسه تغییر مکان های افقی از روش تحلیلی و المان محدود.



شکل ۷: مقایسه تغییر مکان های عمودی از روش تحلیلی و المان محدود.

شکل ۸: مقدار $I = \frac{\Delta Y_{max}}{H}$

نتایج به دست آمده در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

در دو حالت ۱ و ۲ فرض معلوم بودن ضخامت ورق ها بررسی شده و تنها مشخصه L بهینه سازی شده است، اما ممکن است ورق هایی در نظر گرفته شود که بهینه نباشد یعنی این که به ازای بارهای کمتر بتوان از ورق های نازک تری استفاده نمود، به همین منظور در دو

نتایج به دست آمده در شکل (۹) نشان داده شده است.
۲ - بهینه سازی برای پانلی با مشخصات زیر از جنس آلومینیوم انجام شد.

$$E_1 = E_2 = E_{Aluminium}$$

$$G = G_{Aluminium}$$

$$t_1 = t_2 = 0.001m$$

$$h = 0.002m$$

(۲۴)

بررسی شکل‌ها

با بررسی شکل (۱۳) نکات زیر قابل مشاهده می باشد.

۱- در اکثر نقاط L در پانل فولادی بیشتر از L در پانل آلومینیومی است. این امر از قبل نیز قابل پیش بینی بود چون آلومینیوم نسبت به فولاد نرم تر است بنابراین لازم است پانل آلومینیومی فشرده تر از پانل فولادی باشد، حال با توجه به شکل بالا می توان مقدار L را برای پانل‌هایی با جنس‌های دیگر تخمین زد.

۲- همان گونه که در شکل نیز قابل مشاهده است مقدار L همواره بین مقدار ۱ الی ۲ سانتی متر در حال نوسان بوده و همان گونه که از قبل نیز قابل پیش بینی است با افزایش بار به سمت ۱ سانتی متر نزدیک تر می شود بنابراین این بار توجه به بار وارده می توان مقدار تقریبی L را به دست آورد.

مرحله بعدی مقادیر بهینه هر سه مشخصه مؤثر L و t_1 و t_2 را برای جنس‌هایی که در مرحله قبل در نظر گرفته شده است، تعیین گردید.

۳- در این مرحله فرض بر این است که کل پانل از جنس فولاد با مشخصات زیر باشد:

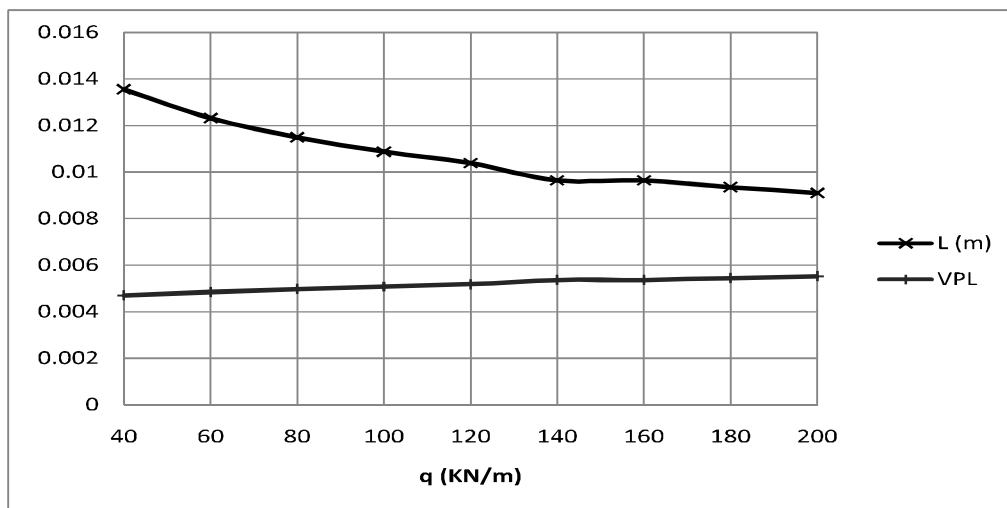
$$\begin{aligned} E_1 = E_2 = E_{Steel} \\ G = G_{Steel} \\ h = 0.002m \end{aligned} \quad (25)$$

نتایج به دست آمده در شکل (۱۱) نشان داده شده است.

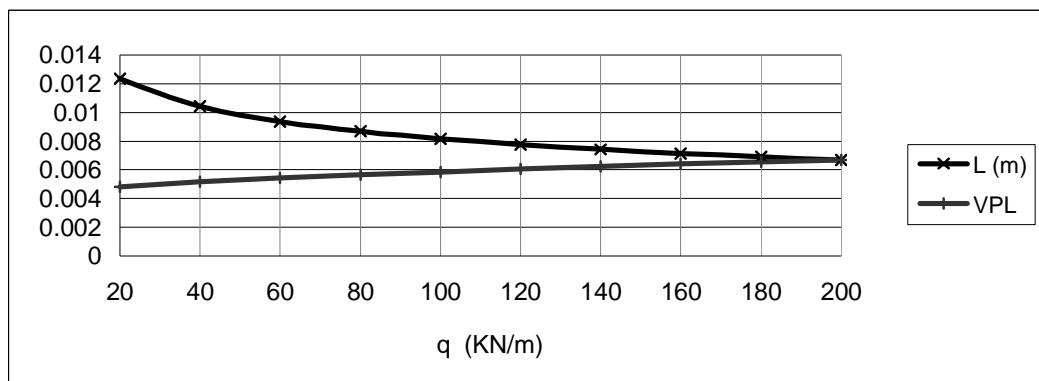
۴- در این مرحله فرض بر این است که کل پانل از جنس آلومینیوم با مشخصات زیر باشد:

$$\begin{aligned} E_1 = E_2 = E_{Aluminium} \\ G = G_{Aluminium} \\ h = 0.002m \end{aligned} \quad (26)$$

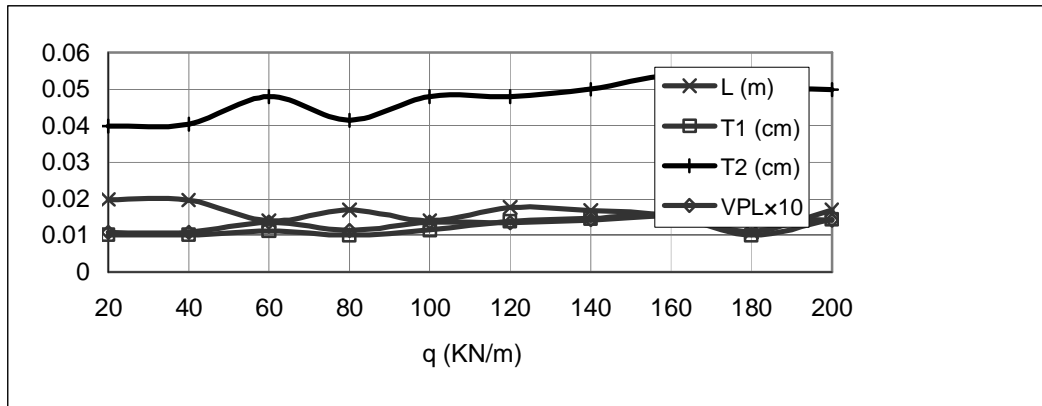
نتایج به دست آمده در شکل (۱۲) نشان داده شده است.



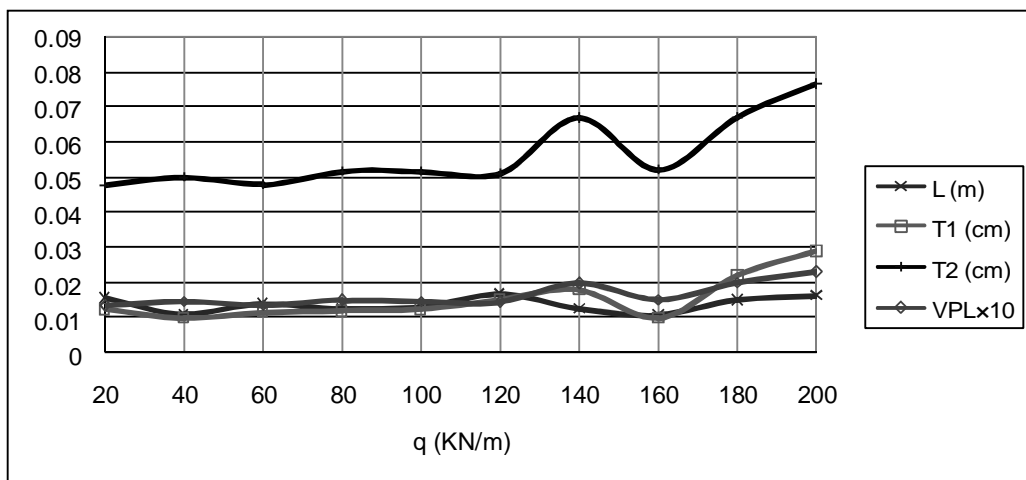
شکل ۹: نتایج بهینه سازی مرحله ۱.



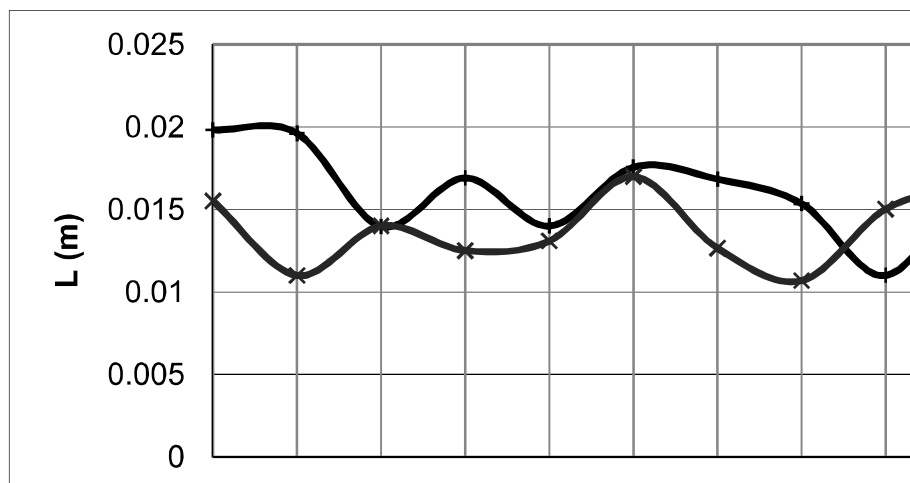
شکل ۱۰: نتایج بهینه سازی مرحله ۲.



شکل ۱۱: نتایج بهینه سازی مرحله ۳.



شکل ۱۲: نتایج بهینه سازی مرحله ۴.



شکل ۱۳: L در بهینه سازی انجام شده برای فولاد و آلومینیوم.

۱ - بدیهی ترین موردی که در شکل (۱۴) قابل مشاهده است افزایش تدریجی ضخامت ورق به کار رفته در هسته در اثر افزایش بار وارده بر آن می باشد، واضح است که هر

شکل (۱۴) به بررسی ضخامت ورق به کار رفته در هسته می پردازد. با بررسی شکل بالا نکات زیر قابل مشاهده می باشد.

در اثر افزایش بار وارده بر آن می باشد، واضح است که هر چه قدر بار زیاد تر می شود باید ضخامت ورق هسته را زیادتر نمود. البته در مواردی که این افزایش ضخامت رعایت نشده است مسلماً مشخصه های دیگر مانند L این افزایش نیافتن را جبران نموده اند اما با فرض این که سایر مشخصه ها ثابت بماند مسلماً این افزایش تدریجی را شاهد خواهیم بود.

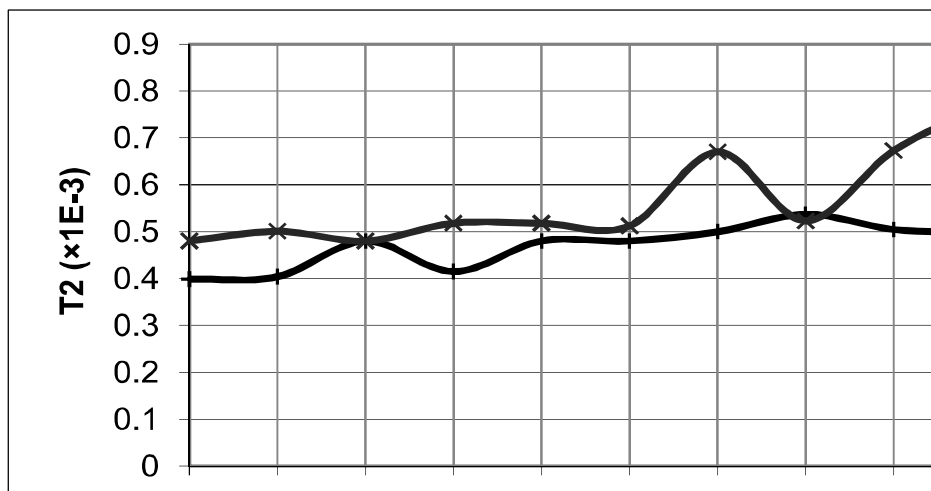
۲ - دومین مطلبی که از شکل (۱۵) می توان مشاهده نمود، آن است که هر قدر ورق به کار رفته به عنوان هسته، محکم تر باشد از ضخامت های کمتری می توان استفاده نمود. این مطلب در شکل به وضوح مشخص است به طوری که در اکثر موارد ضخامت ورق فولادی کمتر از ورق آلومینیومی است.

چه قدر بار زیاد تر می شود باید ضخامت ورق هسته را زیادتر نمود.

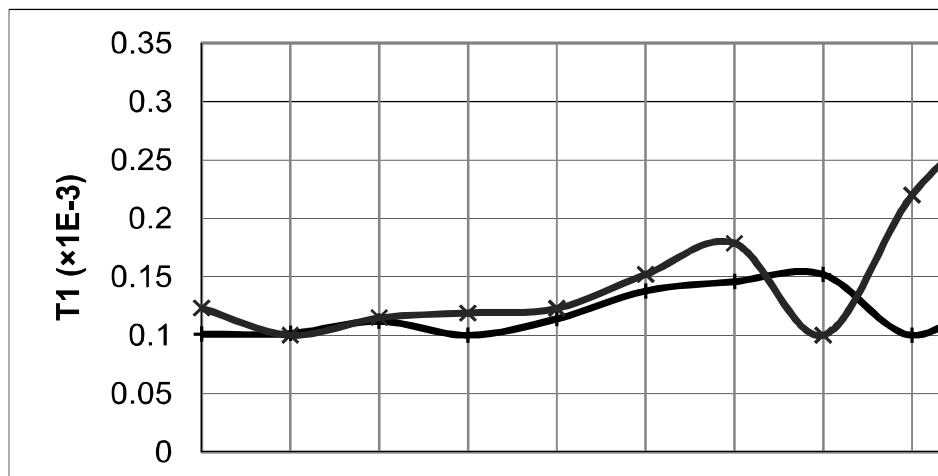
۲ - دومین مطلبی که از شکل (۱۴) می توان مشاهده نمود، آن است که هر قدر ورق به کار رفته به عنوان هسته، محکم تر باشد از ضخامت های کمتری می توان استفاده نمود. این مطلب در شکل به وضوح مشخص است به طوری که همیشه ضخامت ورق فولادی کمتر از ورق آلومینیومی می باشد.

شکل (۱۵) به بررسی ضخامت ورق به کار رفته به عنوان روکش می پردازد.

با بررسی شکل بالا نکات زیر قابل بررسی می باشد:
۱ - بدیهی ترین چیزی که در شکل (۱۵) قابل مشاهده است افزایش تدریجی ضخامت ورق به کار رفته در هسته



شکل ۱۴: مقایسه ضخامت ورق به کار رفته در هسته در بهینه سازی انجام شده برای فولاد و آلومینیوم.



شکل ۱۵: مقایسه ضخامت ورق به کار رفته در روکش در بهینه سازی انجام شده برای فولاد و آلومینیوم.

نتیجه گیری

پیشرفت های آینده در حوزه مهندسی مکانیک، خودروسازی و انرژی باید به سمت و سویی حرکت کند که در آن فرآیندها، ابزار آلات و مواد به نحوی منابع طبیعی و انرژی ما را حفظ کرده و در عین حال از لحاظ فناوری نیز نیازهای ما را برآورده سازد. استفاده از سازه های سبک به عنوان یک راه کار مناسب جهت کاهش هزینه ها، افزایش عمر محصولات و نیز استفاده بهینه از منابع امروزه توجه بسیاری را به خود جلب کرده است.

سازه های ساندویچی عبارتند از سازه های کامپوزیتی که در ساخت آنها برحسب مورد از یک ماده و یا مواد مختلف با شکل های گوناگون استفاده می گردد به نحوی که

دارای وزن کم، مقاومت بالا و خواص دینامیکی خوب باشند.

در این تحقیق برنامه مدلی در نرم افزار MATLAB به صورت m-file تهیه شده است که در آن کاربر می تواند مشخصات پانل مورد نظر خود را از قبیل جنس و محدوده هرکدام از مشخصه ها را در فایل وارد کرده سپس با استفاده از جعبه ابزار MOEA جواب های بهینه را ملاحظه نماید، سپس با اجرای دستورات APDL داده شده در محیط ANSYS و وارد کردن مشخصه های بهینه جواب های حاصل از تحلیل را مشاهده نماید که این امر می تواند کمک بسیار خوبی برای سازندگان این پانل ها باشد.

مراجع

- 1 - Pizhong Qiao and Jialai Wang, (2005). "Mechanics of composite sinusoidal honeycomb cores." *Journal of Aerospace Engineering* ©asce/, 10/1061/(ASCE)0893-1321200518:142
- 2 - Davalos, J. F., Qiao, P., Xu, X. F., Robinson, J. and Barth, K. E. (2001). "Modeling and characterization of fiber-reinforced plastic honeycomb sandwich panels for highway bridge applications." *Composite Structures*, Vol. 52, Issues 3-4, PP. 441-452.
- 3 - Xu, X. F., Qiao, P. and Davalos, J. F. (2001). "Transverse shear stiffness of composite honeycomb core with general configuration." *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 127, No. 11, PP. 1144-1151.
- 4 - Shakeri, M. (1379). *Advance Strength of Materials and Applied Elasticity*, Amir Kabir pub. 2nd edd. ANSYS help documents, www.ansys.com/services/ss-documentation-manuals.asp
- 5 - GA and engineering design, by: Gen (1998). *Computers & Operations Research*, Vol. 25, Issue 3, PP. 229-237.
- 6 - Goldberg, D. E. (1989). *Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley Professional; 1 edition, January 11.
- 7 - Zbigniew Michalewicz. (1993). *Genetic Algorithms+ Data Structures= Evolution Programs*, Springer; 1 edition, February 24.
- 8 - Mitsuo Gen. (1999). *Genetic Algorithms and Engineering Optimization*, Wiley-Interscience, December 28.
- 9 - Xu, X. F., Qiao, P. and Davalos, J. F. (2001). "Transverse shear stiffness of composite honeycomb core with general configuration." *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 127, No. 11, PP. 1144-1151.
- 10 - Tan, K.C. Lee, T. H. Khoo, D. Khor, E. F. and Kannan, R. S.(2000). Dept. of Electr. Eng., Nat. Univ. of Singapore, "MOEA toolbox for computer aided multi-objective optimization", *Evolutionary Computation*, 2000. Proceedings of the 2000 Congress, Vol. 1, PP. 38-45, USA.
- 11 - MATLAB help documents, <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/helpdesk.html>
- 12 - Silverman, R. A. (1378). "Differential and integral analysis by analytical geometry." *Translated in Percian* by Dr. A. Alem zadeh, Ghoghhus pub. 6th edd.