طراحی و بهینه‌سازی وزن صفحه کامپوزیتی تحت بار پین

محمد علیپور[1]، محمود مهرداد شکریه[2]
mohalipoor@yahoo.com

چکیده

در طراحی و بهینه‌سازی یک سازه کامپوزیتی، پارامترهایی همچون تعداد لایه‌ها، زوایای لایه‌ها، چیدمانی، نوع مواد و غیره مطرح می‌شود. در این تحقیق هدف طراحی صفحه کامپوزیتی تحت بار پین و پس از آن بهینه‌سازی وزن این سازه است. با توجه به وجود سوراخ در صفحه کامپوزیتی و تمرکز تنش ناشی از آن، طراحی و بهینه‌سازی به صورت همزمان بر روی دو ناحیه، شامل ناحیه اطراف سوراخ و ناحیه دور از منطقه سوراخ انجام می‌شود. به منظوردستیابی به ترکیبی با تعداد لایه‌های عملی در فرآیند بهینه‌سازی و با توجه به استفاده از نرم‌افزار ANSYS برای برنامه‌نویسی، مناسب‌ترین روش انتخابی، روش بهینه‌سازی شاخه و مرز (Branch & Bound) می‌باشد. مطالعه بر روی چندلایی‌های شبه‌ایزوتروپیک (quasi isotropic)، صلیبی (cross ply) و صلیبی مورب (angleply) انجام می‌شود. نتایج به‌دست آمده حاکی از قویتر بودن چندلایی شبه‌ایزوتروپیک نسبت به چندلایی صلیبی و آن نیز نسبت به چندلایی صلیبی مورب است. این برتری استحکام در یک بار خاص و کمتر از آن عوض می‌شود یعنی می‌توان از چندلایی صلیبی به جای چندلایی شبه‌ایزوتروپیک استفاده کرد. در ایم مقاله تاثیر پارامترهای هندسی چندلایی بر استحکام آن نیز بررسی شده است.

کلیدواژه:

شبه ایزوتروپیک - صلیبی مورب - بار واماندگی لایه نخست

Archive of SID

۱- کارشناس ارشد، طراحی و ساخت ماشین‌آلات و تجهیزات، ریخته‌گری تراکتورسازی، تراکتورسازی تبریز، ایران

۲- دانشیار دانشگاه علم و صنعت ایران، آزمایشگاه تحقیقاتی مواد مرکب، دانشکده مهندسی مکانیک،shokrieh@iust.ac.ir

www.SID.ir

۱- مقدمه

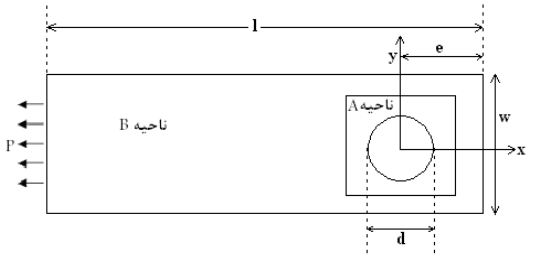
سازه‌ها معمولا دارای قطعات ایجاد کننده تمرکز تنش هستند که تحت تاثیر بارهای مختلف قرار می‌گیرند. نواحی اطراف اتصالات در سازه‌ها معمولا جزو مناطق ضعیف هستند، چرا که وجود اتصالات باعث تمرکز تنش در این نواحی می‌شود. به ندرت میتوان سازه‌هایی ساخت که در آنها از اتصالات استفاده نشده باشد. همه اتصالات در سازه‌ها بالقوه نقاط ضعیفی هستند. برای جلوگیری از واماندگی لایه‌ها در اطراف محل تمرکز تنش، تقویت این قسمت از صفحه کامپوزیتی اجتناب‌ناپذیر است.

مطالعه کارهای انجام شده در مورد صفحات کامپوزیتی نشان می‌دهد که اغلب مطالعات بهینه‌سازی بر روی صفحات ساده بدون سوراخ و یا تقویت شده بوده است. از جمله کارهای انجام شده در مورد بهینه‌سازی وزن یا ضرایب کمانش صفحات کامپوزیتی، میتوان به موارد زیر اشاره کرد: اشمیت (Schmith) و فرشی (Farshi) با ارائه روشی تئوریک و تعدادی تقریبات ریاضی با استفاده از روش دایره‌های محاطی، وزن سازه کامپوزیتی را بهینه کردند[۱]. وزن صفحه مورد نظر تحت شرایط بارگذاری چندگانه با اعمال محدودیتهای سفتی و مقاومتی بهینه می‌شود. هافکا (Haftka)، گوردال (Gurdal) و نگاندرا (Negandra) الگوریتم‌های ژنتیک را به صورت تخصصی برای بهینه‌سازی چیدمانی چندلایی کامپوزیتی، با استفاده از راه حلهای کوتاه و بسته، تحت قیود استحکامی و کمانش توسعه داده‌اند[۲]. فونگ (Fong) و اسپرینگر (Springer) با استفاده از روش اتفاقی به اسم مونت کارلو (Monte Carlo) موفق به طراحی چندلایی‌های متشکل از چند ماده جهت دستیابی به مقاومت بالا شده‌اند[۳].

فدلینسکی (Fedelinski) و گرسکی (Gorski) با استفاده از روش المان مرزی سفتی سازه کامپوزیتی را بهینه کردند[۴]. تابع هدف میزان جابجایی در مرزها بوده است.

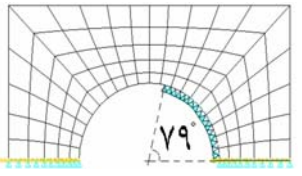
در این قسمت به معرفی مطالعاتی می‌پردازیم که در مورد صفحات کامپوزیتی تحت بار پین انجام یافته است.

بوکت اکوتان (Buket Okutan) تاثیر پارامترهای هندسی را در مقاومت واماندگی چندلایی کامپوزیتی بررسی کرده است[۵]. این کار در جهت طراحی بهینه چندلایی انجام گرفته است. بنابراین پارامترهای هندسی اتصال همچون عرض صفحه ،فاصله سوراخ از انتها، قطر سوراخ و ضخامت چندلایی و همچنین تاثیر زوایای لایه‌ها در مقاومت واماندگی چندلایی در اطراف اتصال بررسی شده و حالت بهینه‌ای از پارامترها مشخص می‌شود. این شخص در مقاله دیگری تاثیر همان پارامترهای هندسی را در مد واماندگی که عبارتند از



شکل (۱): شکل کلی مسئل

شکل (۲): مدل المان محدود



شکل (۳): اعمال شرایط مرزی بر مرز سوراخ

جدول (۱): ثابت‌های مهندسی و مقاومت‌های مربوط به ماده AS4/3501-6

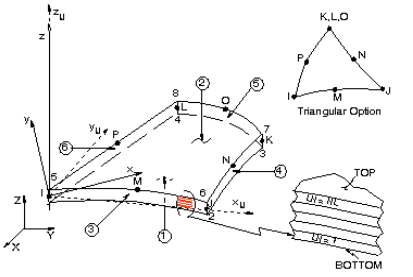
ثابت‌های مهندسی(engineering constants)		
مدول طولي	E_x(GPa)	147
مدول عرضي	E_y(GPa)	9
مدول برشي	G_{xy}(GPa)	5
ضريب پواسون	γ_{xy}	0.3
مقاومتها (strengths)		
مقاومت كششي طولي	X_t(MPa)	2004
مقاومت فشاري طولي	X_c(MPa)	1197
مقاومت كششي عرضي	Y_t(MPa)	53
مقاومت فشاري عرضي	Y_c(MPa)	204
مقاومت برشي	S(MPa)	137

لهیدگی (Bearing)، برش (Shear Out) و کشش خالص (Net Tension) را برای اتصالات پین‌دار بررسی نموده است[۶].

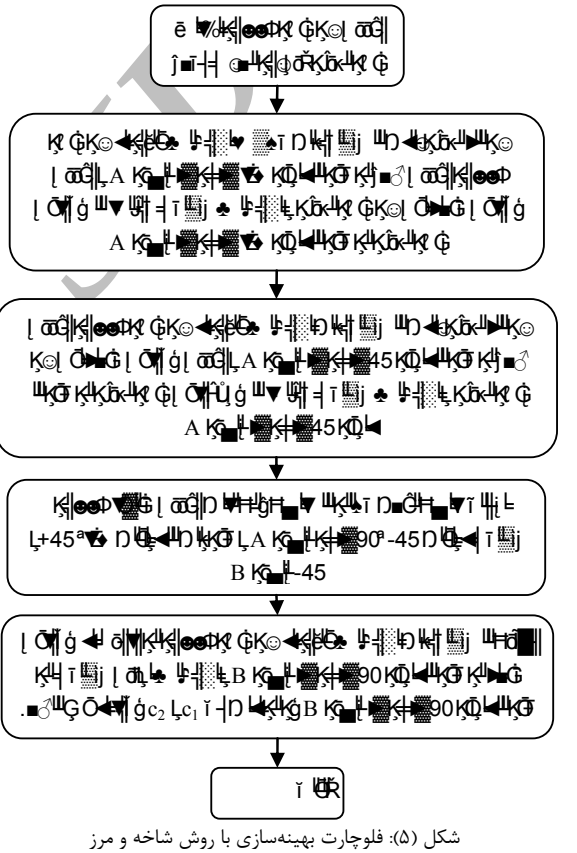
کویین (Quinn) و ماتیوس (Mathews) به تاثیر چیدمانی در مقاومت لهیدگی در اتصالات کامپوزیتی پرداخته‌اند[۷]. مقاومت لهیدگی با انواع چیدمانی‌های هشت‌لایه‌ای دارای زوایای 0، $45+$، $45-$ و 90 درجه مطالعه گردید. نتایج به‌دست آمده از این تحقیق نشان داد که بهتر است لایه با زاویه 90 درجه در سطح یا در نزدیکی سطح قرار بگیرد زیرا مقاومت لهیدگی اتصال افزایش می‌یابد. چندلایی که بیشترین مقاومت لهیدگی را دارد به صورت $[0,+45,-45,90]_s$ می‌باشد. از جمله پارامترهایی که در

Archive of SID

www.SID.ir



شکل (۴): المان لایه‌ای shell 99 [۱۲]



شکل (۵): فلوچارت بهینه‌سازی با روش شاخه و مرز

مقاومت واماندگی چندلایی کامپوزیتی تحت بار پین تاثیر دارند عبارتند از: ضخامت لایه‌ها، اصطکاک، نیروی بستن، پیکربندی پیچ، چیدمانی، قطر پیچ ،لقی و تکیه‌گاه‌جانبی. توماس‌ایرمان (Tomas Ireman) در مقاله‌ای نشان داده است که از این هشت پارامتر پارامترهایی نظیر ضخامت لایه‌ها، اصطکاک، نیروی بستن و پیکربندی پیچ تاثیر بیشتری خواهند داشت[۸].

در این تحقیق برای اینکه بتوانیم با یک حالت عملی اطراف سوراخ را تقویت کنیم از روشهای بهینه‌سازی با اعداد صحیح مثبت استفاده می‌کنیم. همانطور که اشاره شد در این تحقیق روش شاخه و مرز بهترین روش انتخابی برای بهینه‌سازی است. لازم به ذکر است که در نتایج به‌دست آمده به جای وزن از عبارت حجم استفاده می‌شود. گفتنی است با مشخص بودن حجم، نسبت حجمی الیاف (volume fraction) و چگالی رزین و الیاف، وزن چندلایی مورد نظر مشخص می‌شود.

۲- حالت کلی مسئله

یک صفحه کامپوزیتی با طول $l = 100\ \ mm$، ضخامت تک‌لایه $t = 0.146\ \ mm$، عرض w، فاصله از انتهای e و قطر سوراخ $d = 0.005\ \ m$ مورد نظر می‌باشد(شکل ۱). بار $P(N/m)$ بر انتهای صفحه به صورت استاتیکی وارد می‌شود. در سوراخ مورد نظر یک پین صلب قرار دارد. مطالعه بر روی چیدمان $[0_a/90_b]_s$، $[0_a,+45_b,-45_c,90_d]_s$ و $[+45_a,-45_b]_s$ انجام خواهد شد. بنابراین سه ترکیب چیدمانی برای بهینه‌سازی وزن خواهیم داشت: شبه ایزوتروپیک، صلیبی، و صلیبی مورب. مقادیر a، b، c و d در انتهای فرآیند بهینه‌سازی ضرایب صحیح مثبت از ضخامت ورودی t خواهد بود. t ضخامت یک تک‌لایه است.

۳- مدلسازی المان محدود

صفحه سوراخدار مورد نظر به دلیل هندسه و بارگذاری متقارن نسبت به محور x به شکل (۲) مدل می‌شود. محور x محور تقارن است. بر اساس روش کنتی(Conti) وجود پین با مقید کردن گره‌های موجـــــود بین زوایای صفر و ۷۹ درجه اطراف سوراخ مدل می‌شود[۹] (شکل۳).

ورودی‌هایی که به عنوان پارامتر خواسته می‌شود عبارتند از: d، e/d، w/d و P. شبکه‌بندی المان محدود اعمالی در شکل(۲) دیده می‌شود. این شبکه‌بندی به صورت دستی انجام گرفته و برای دقت محاسبات تعداد المانها در اطراف سوراخ بیشتر در نظر گرفته می‌شود. گره‌های موجود بر روی محور x تنها مجاز به حرکت در این جهت هستند. ماده انتخابی کامـــــــــپوزیت کربن-اپوکسی $AS4/3501-6$ با ثوابت مهندسی مدون در جدول(۱) می‌باشد[۱۰].

معیار واماندگی که برای مدل انتخاب می‌شود معیار تسای-وو[۱۱] به صورت دو بعدی می‌باشد. معیار تسای- وو به صورت زیر تعریف می‌شود[۱۱]:

$$F_{xx}\sigma_x^2+2F_{xy}\sigma_x\sigma_y+F_{yy}\sigma_y^2+F_{ss}\sigma_s^2+F_x\sigma_x+F_y\sigma_y\le 1 \qquad (1)$$

در این رابطه σ_x، σ_y و σ_s تنشهای مربوط به هر لایه در جهات و عمود بر جهات الیاف و عبارات شامل علامت F مربوط به

Archive of SID

www.SID.ir

مقاومتهای طولی، عرضی و همچنین برشی می‌باشد.

المان انتخابی برای شبکه‌بندی، المان *shell99* [۱۲] خطی می‌باشد(شکل ۴). این المان برای کاربردهای لایه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به حجیم بودن برنامه نوشته شده و با توجه به خطی بودن مسئله از این المان استفاده شد. برای بهینه‌سازی از روش شاخه و مرز استفاده می‌شود[۱۳]. روش شاخه و مرز روشی گسسته در بین روشهای بهینه‌سازی است.

۴- فلوچارت حل مسئله بهینه‌سازی

شکل کلی مسئله بهینه‌سازی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Minimize \quad Tvol \qquad (۲)$$

$$subject \quad to: 0.8\langle c_1 \langle 0.9, 0.8\langle c_2 \langle 0.9 \qquad (۳)$$

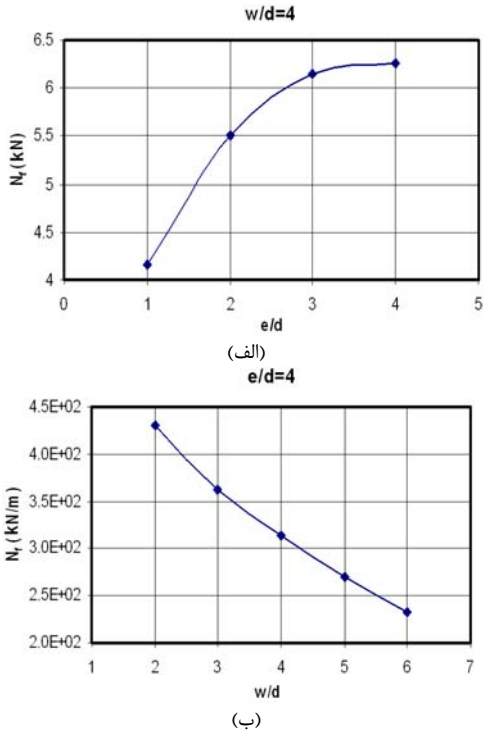
$$Thick_{iA} / t_0 \in +Z, Thick_{iB} / t_0 \in +Z \qquad (۴)$$

که در آن $Tvol$ حجم کلی سازه، c_1 و c_2 به ترتیب متعلق به بیشترین شاخص تسای- وو دو ناحیه مورد نظر برای بهینه‌سازی می‌باشد(شکل ۱). قیدهای انتهایی نیز به معنی انتخاب تعداد مشخصی از لایه‌ها برای هر زاویه از لایه‌هاست.

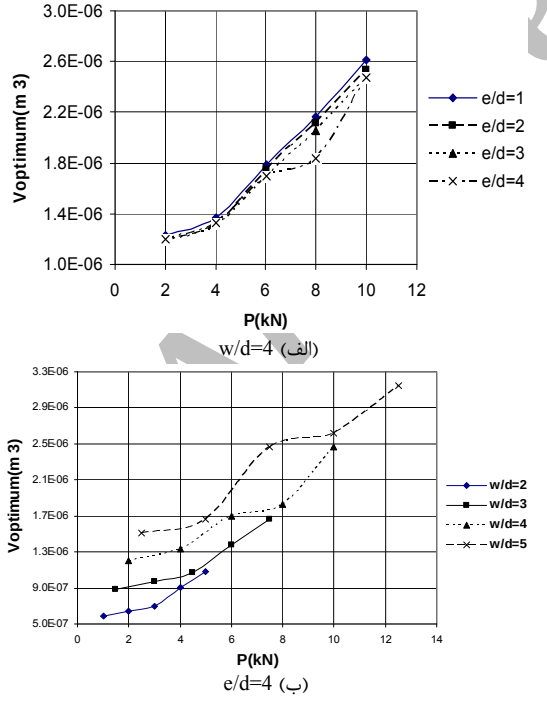
مبنای حل مسئله کلی استفاده از روش شاخه و مرز می‌باشد. به دو دلیل مهم از این روش استفاده می‌شود: ۱- نسبت به روشهای مشابه خود دارای تعداد مراحل کمتری برای رسیدن به نقطه بهینه می‌باشد و ۲- دارای قابلیت بهتری برای تبدیل به برنامه قابل اجرا در نرم‌افزار المان محدود Ansys است. در روش شاخه و مرز ابتدا یکبار فرآیند بهینه‌سازی با متغیرهای پیوسته انجام شده و پس از به‌دست آمدن این نقطه کلیه عملیات در اطراف آن نقطه انجام می‌پذیرد. پس از به‌دست آوردن نقطه شروع اولیه(مشخص شدن ضخامت لایه‌ها با بهینه‌سازی پیوسته)، الگوریتم موجود در شکل ۵ که روش شاخه و مرز در آن گنجانده شده است برای به‌دست آوردن ترکیب بهینه چندلایی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۵- نتایج و تحلیل آن

یکبار برای ترکیب ثابت صفحه شبه ایزوتروپیک به صورت $[0_5,+45_5,-45_5,90_5]_s$ با مقدار ثابت $w/d=4$ و مقدار متغیر e/d (شکل ۶-الف) و یکبار با مقدار ثابت $e/d=4$ و مقدار متغیر w/d مقادیر بار واماندگی لایه نخست N_f (شکل ۶-ب) پیدا می‌شود. همانطور که از شکل نیز مشاهده می‌شود واحد بار در دو شکل الف و ب باهم متفاوت است. علت استفاده از اینچنین واحدهایی، تنها نشان دادن رفتار واقعی صفحه کامپوزیتی



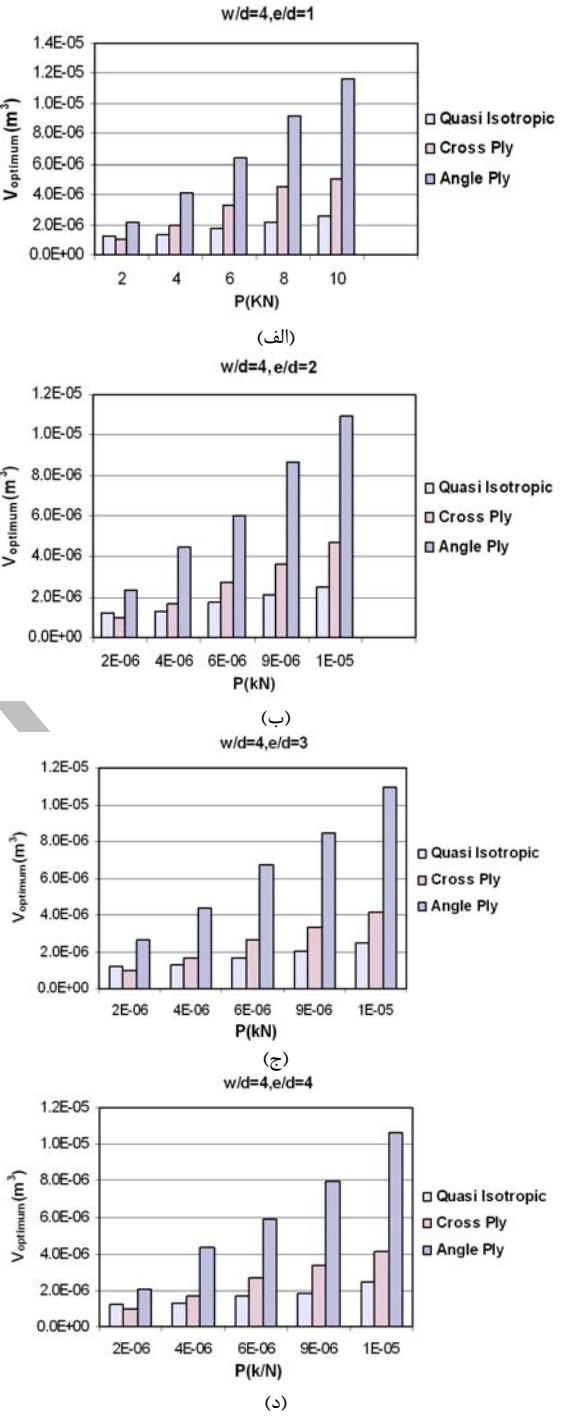
شکل (۶): تغییرات بار واماندگی لایه نخست چندلایی شبه‌ایزوتروپیک نسبت به پارامترهای هندسی



شکل (۷): تغییرات حجم بهینه صفحه شبه‌ایزوتروپیک

است. مقادیر بار واماندگی لایه نخست به روش نسبتهای مقاومت محاسبه می‌شود[۱۱]. نمودارهایی هم که برای صفحات صلیبی و

www.SID.ir



شکل (۸): مقایسه حجمهای بهینه بدست آمده بین چندلایی‌های مختلف با w/d=۴

صلیبی مورب به‌دست می‌آید بصورت شماتیک همچـــــون شکل ۶ می‌باشد. نمودارهای شکل ۶ از لحاظ نحوه صعود با نمودارهای ارائه شده در مرجع [۶] همخوانی خوبی دارند. نمودار (۶-الف) نشان می‌دهد که برای یک صفحه شبه ایزوتروپیک افزایش مقدار e/d باعث افزایش بار واماندگی لایه نخست می‌شود. پس نزدیک شدن سوراخ به محل بارگذاری باعث افزایش استحکام چندلایی می‌شود.

همانطور که خواهیم دید این افزایش استحکام تعداد لایه‌های بهینه به‌دست آمده را تحت تاثیر قرار خواهد داد. همین امر برای نمودار (۶-ب) نیز صادق است. در نمودار (۶-ب) مقدار بار واماندگی لایه نخست با افزایش w/d کاهش می‌یابد. البته قابل ذکر است که در کاهش استحکام قید ثابت بودن حجم مطرح می‌شود. یعنی با ثابت بودن حجم چندلایی کامپوزیتی، افزایش w/d باعث کاهش استحکام چندلایی کامپوزیتی خواهد شد. این کاهش استحکام اثرات خود را در حجم بهینه صفحات کامپوزیتی نمایان می‌سازد.

در این مرحله بار P بر چندلایی کامپوزیتی اعمال می‌شود و مقادیر حجم بهینه تحت این بارها به‌دست می‌آیند(شکل ۷). این نمودار مربوط به چندلایی شبه ایزوتروپیک می‌شود. در نمودارهای شکل(۷) استخراج شده، یک‌بار $w/d=4$ بوده و e/d تغییر خواهد کرد و بار دیگر $e/d=4$ بوده و w/d از عدد ۲ به سمت ۵ مقادیر صحیح را اختیار خواهد کرد. همانطور که قبلا نیز از نمـودار شکل (۶-الف) پیش‌بینی می‌شد در شکل (۷-الف) با افزایش e/d و نزدیک شدن سوراخ به محل بارگذاری، در بارگذاریهای یکسان مقادیر حجم بهینه کمتری به‌دست می‌آید و این به معنی افزایش استحکام چندلایی است. پیش‌بینی نمودار (۶-ب) نیز درست بوده است زیرا از شکل (۷-ب) میتوان دید که برای یک حجم ثابت، بار واماندگی لایه نخست چندلایی با w/d پایین‌تر بیشتر از بار واماندگی لایه نخست چندلایی با w/d بالاتر است و نشان می‌دهد که افزایش w/d با ثابت بودن حجم چندلایی باعث کاهش استحکام آن می‌شود. چیدمانی‌های به‌دست آمده برای بارهای نمودار (۶-الف) در جداول(۲) تا(۵) در قسمت ضمیمه آورده شده است. همانطور که از این جداول پیداست با افزایش بار، تقویت الیاف با زاویه صفر درجه نسبت به سایر زوایا بیشتر صورت می‌گیرد زیرا بوسیله تحلیلهای انجام یافته با نرم‌افزار Ansys مشخص شد که الیاف با زاویه صفر درجه در المانهای بحرانی در جهت تنشهای داخلی حداکثر قرار می‌گیرند و چون فرآیند بهینه‌سازی صورت می‌گیرد تقویت این زاویه نسبت به سایرین قابل توجیه است.

پس از به‌دست آوردن نمودارهای مزبور و حجم‌های بهینه، مقایسه‌ای بین حجمهای بهینه به‌دست آمده برای سه نوع چندلایی صورت می‌گیرد(شکل ۸). همانطور که مشاهده می‌شود چندلایی صلیبی مورب ضعیفتر از سایر چندلایی‌ها رفتار می‌کند زیرا در شرایط یکـــــسان دارای حجم بهینه بیشتری است. علت این امر را نیز میتوان در مقدار زوایای الیاف به کار رفته جستجو کرد. چندلایی صلیبی نیز نسبت به چندلایی شبه ایزوتروپیک ضعـیف‌تر عمل می‌کند و حـجم بهینه آن بیشتر از حجم بهینه چندلایی شبه

Archive of

www.SID.ir

ایزوتروپیک است. در بارهای پایین‌تر اختلاف حجم‌های بهینه کمتر است ولی در بارهای بالاتر به عنوان مثال بار $۵۰۰\ kN/m$ اختلاف حجم بهینه صفحه صلیبی مورب با دیگر صفحات بیشتر می‌شود.

البته شایان ذکر است با توجه به نمودارهای شکل ۸، در بار کمتر از $۲۰۰\ kN/m$ کارایی چندلایی صلیبی و شبه ایزوتروپیک نسبت به هم عوض می‌شود و چندلایی صلیبی قویتر شده و حجم کمتری برای تحمل بار نیاز دارد.

۶- نتیجه‌گیری

روش شاخه و مرز یکی از بهترین روشهای بهینه‌سازی گسسته است که هم دارای تعداد مراحل کمتری برای رسیدن به نقطه بهینه بوده و هم قابلیت تبدیل به برنامه اجرایی در نرم‌افزار المان محدود Ansys را دارد. نتایجی که در این تحقیق با استفاده از این روش به‌دست آمده به قرار زیر است:

با افزایش e/d بار واماندگی لایه نخست افزایش یافته و در نتیجه حجم بهینه به‌دست‌آمده به ازاء همان بارهای واماندگی کاهش می‌یابد.

برای یک حجم ثابت چندلایی، با افزایش w/d بار واماندگی لایه نخست کاهش یافته و به ازاء یک بار یکسان با افزایش w/d حجم بهینه افزایش می‌یابد.

برای بارهای بیشتر از $۲۰۰\ kN/m$ چندلایی شبه ایزوتروپیک نسبت به چندلایی صلیبی و آن نیز نسبت به چندلایی صلیبی مورب قویتر می‌باشد.

چندلایی‌های شبه ایزوتروپیک با چندلایی‌های صلیبی در بارهای کمتر از $۲۰۰\ kN/m$ قابل جایگزینی می‌باشد.

روش شاخه و مرز به خاطر دستیابی به حجم بهینه در چندلایی‌های شبه‌ایزوتروپیک و صلیبی، الیاف با زاویه صفر درجه را بیشتر تقویت می‌کند.

۷- تقدیر و تشکر

بدینوسیله از جناب دکتر محمود مهرداد شکریه که در انجام این تحقیق از راهنماییهای بیدریغ ایشان بهره‌مند بوده‌ام تشکر و قدردانی میشود.

۸- ضمایم

در جداول زیر چیدمان بهینه برای بارهای نمودار (۶-الف) ارائه شده‌اند.

جدول (۲): چیدمان به‌دست آمده برای چندلایی شبه ایزوتروپیک (w/d=4,e/d=1)

P (kN)	چیدمان بهینه به‌دست آمده برای ناحیه A	چیدمان بهینه به‌دست آمده برای ناحیه B
2	$[0_4,+45_2,-45_2,90_2]_S$	$[0_1,+45_1,-45_1,90_1]_S$
4	$[0_6,+45_7,-45_4,90_5]_S$	$[0_1,+45_1,-45_1,90_1]_S$
6	$[0_{10},+45_8,-45_8,90_8]_S$	$[0_2,+45_1,-45_1,90_1]_S$
8	$[0_{12},+45_{11},-45_{10},90_{10}]_S$	$[0_2,+45_1,-45_2,90_1]_S$
10	$[0_{15},+45_{15},-45_{14},90_{13}]_S$	$[0_3,+45_1,-45_2,90_1]_S$

جدول (۳): چیدمان به‌دست آمده برای چندلایی شبه ایزوتروپیک(w/d=4,e/d=2)

P (kN)	چیدمان بهینه به‌دست آمده برای ناحیه A	چیدمان بهینه به‌دست آمده برای ناحیه B
2	$[0_2,+45_3,-45_1,90_1]_S$	$[0_1,+45_1,-45_1,90_1]_S$
4	$[0_6,+45_4,-45_4,90_4]_S$	$[0_1,+45_1,-45_1,90_1]_S$
6	$[0_9,+45_7,-45_8,90_7]_S$	$[0_2,+45_1,-45_1,90_1]_S$
8	$[0_{11},+45_9,-45_9,90_9]_S$	$[0_2,+45_1,-45_2,90_1]_S$
10	$[0_{14},+45_{12},-45_{12},90_{12}]_S$	$[0_3,+45_1,-45_2,90_1]_S$

جدول (۴): چیدمان به‌دست آمده برای چندلایی شبه ایزوتروپیک(w/d=4,e/d=3)

P (kN)	چیدمان بهینه به‌دست آمده برای ناحیه A	چیدمان بهینه به‌دست آمده برای ناحیه B
2	$[0_2,+45_2,-45_1,90_2]_S$	$[0_1,+45_1,-45_1,90_1]_S$
4	$[0_5,+45_4,-45_4,90_4]_S$	$[0_1,+45_1,-45_1,90_1]_S$
6	$[0_8,+45_6,-45_6,90_6]_S$	$[0_2,+45_1,-45_1,90_1]_S$
8	$[0_{10},+45_9,-45_9,90_9]_S$	$[0_3,+45_1,-45_1,90_1]_S$
10	$[0_{13},+45_{11},-45_{11},90_{11}]_S$	$[0_3,+45_1,-45_2,90_1]_S$

جدول (۵): چیدمان به‌دست آمده برای چندلایی شبه ایزوتروپیک(w/d=4,e/d=4)

P (kN)	چیدمان بهینه به‌دست آمده برای ناحیه A	چیدمان بهینه به‌دست آمده برای ناحیه B
2	$[0_3,+45_2,-45_1,90_2]_S$	$[0_1,+45_1,-45_1,90_1]_S$
4	$[0_5,+45_6,-45_4,90_4]_S$	$[0_1,+45_1,-45_1,90_1]_S$
6	$[0_6,+45_7,-45_6,90_7]_S$	$[0_2,+45_1,-45_1,90_1]_S$
8	$[0_{10},+45_{10},-45_9,90_9]_S$	$[0_2,+45_1,-45_1,90_1]_S$
10	$[0_{13},+45_{11},-45_{11},90_{11}]_S$	$[0_3,+45_1,-45_2,90_1]_S$

Archive of SID

www.SID.ir

۹- مراجع

[1] L. A. SCHMITH and B. FARSHI, "*Optimum Laminate Design for Strength and Stiffness*", Int. J. for Numerical Methods in Engineering, Vol 7, p.p 519-536, 1973.

[2] S. NAGENDRA, R. T. HAFTKA and Z. GURDAL, "*Genetic Algorithms for the Design of Composite Panels*", Advanced Technology for Design and fabrication of Composite materials and Structures, p.p. 129-143, 1995.

[3] S. J. HARDY and N. H. MALIK, "*Optimum Design of Laminated Structural Members*", IMechE, p.p. 49-60, 1989.

[4] R. GORSKI and P. FEDELINSKI, "*Analysis, Optimization and Identification of Structures Using Boundary Element Method*", Numerical Methods in Continuum Mechanics, Slovack Republic, 2003.

[5] Buket Okutan, "*The effect of geometric parameters on the strength for pin-loaded multi-directional fiber-glass reinforced epoxy laminate*", composite science and technology 63, Elsevier Applied Science Publishers, p.p. 567-578, 2002.

[6] Buket Okutan, Ramazan Karakuzu, "*The strength of pinned joints in laminated composites*", composite science and technology 63, Elsevier Applied Science Publishers, p.p. 893-905, 2003.

[7] W. J. QUINN and F. L. MATHEWS, "*The effect of stacking sequence on the pin-bearing strength in glass fiber reinforced plastics*", J. Composite Materials, Vol. 11,p.p. 139, 1977.

[8] Tomas Ireman, "*Design of Composite Structures Containing Bolt Holes and Open Holes*", ISSN 0280-4646, Department of Aeronautics Kungliga Tekniska Hgskolan.

[9] P. CONTI, "*Influence of Geometric Parameters on the stress Distribution Around a Pin-Loaded Hole in a Composite Laminate*", Composite Science and Technology, Elsevier Applied Science Publishers, p.p. 83-101, 1986.

[10] AS4/3501-6 material is used with the material property measured in composite materials laboratory of McGill University

[11] Stephen W. Tsai and H. Thomas Hahn, "*Introduction to composite materials*", TECHNOMIC Publishing Co. Inc, p.p. 302-306, 1980.

[12] ANSYS 8.1 HELP PART, elements, shell elements, shell99.

[13] P. VENKATARAMAN, "*Applied Optimization with Matlab Programming*", A Wiley Interscience Publication, p.p. 318-336.

Archive of SID

www.SID.ir