



بهینه‌سازی ضخامت اجزای جعبه‌بال یک هواپیما با روش طراحی آزمایش‌ها

بهروز شهریاری^{۱*}، اصغر مهدیان^۲، مهدی شیرانی^۳، مصطفی صحرایی^۴، مجتبی اسماعیلیان^۵

^۱ استادیار، مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران.

^۲ دانشیار، مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران.

^۳ کارشناسی ارشد مکانیک، مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران.

^۴ دکتری هوافضا، شرکت صنایع هواپیماسازی ایران، اصفهان، ایران.

^۵ دکتری مکانیک، مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۱۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۲/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۱

چکیده

بهینه‌سازی سازه در صنایع هوافضا به دلیل نیاز به سازه‌های سبک جهت کاهش هزینه‌ها و افزایش عملکرد پروازی از اهمیت ویژه برخوردار است. اجزای اصلی بال هواپیما از اسپرها، ریب‌ها و پوسته تشکیل شده است. در این پژوهش ابتدا یک سازه بال دارای دو اسپار I شکل، ۶ عدد ریب و پوسته با مشخصات هندسی مشخص مدل‌سازی شده است. با انتخاب آلایژ آلومینیوم به عنوان جنس سازه و استفاده از روش المان محدود، سازه بال تحت بارگذاری استاتیکی قرار گرفته و مقدار بیشترین تنش و جابه‌جایی ناحیه جعبه‌بال بدست آمده است. سپس با توجه به نتایج تحلیل و قابلیت بهینه‌سازی، سازه بال جهت بهینه‌سازی ضخامت اجزا در راستای طول بال به سه قسمت تقسیم گردیده است. با تعریف ضخامت اجزای جعبه‌بال در هر سه قسمت به عنوان فاکتورها و تنش و وزن به عنوان پاسخ‌های مسئله بهینه‌سازی از طریق روش طراحی آزمایش‌ها که در این مسئله آزمایش‌ها همان تحلیل استاتیکی سازه است، ضخامت اجزای ناحیه جعبه‌بال با توجه به هدف کمترین وزن و بیشترین تنش مجاز بهینه‌سازی گردیده است. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که پس از بهینه‌سازی وزن جعبه‌بال با کاهش ۴۶/۵ درصدی روبرو شده است.

کلمات کلیدی: سازه بال هواپیما؛ جعبه‌بال؛ تحلیل؛ بهینه‌سازی؛ طراحی آزمایش‌ها.

Thickness optimization of the airplane wing box components by the design of experiments method

B. Shahriari^{1*}, A. Mahdian², M. Shirani³, M. Sahraei⁴, M. Ismailian⁵

¹Assist. Prof., Faculty of Mechanics, Malek Ashtar University of Technology, Isfahan, Iran.

²Assoc. Prof., Faculty of Mechanics, Malek Ashtar University of Technology, Isfahan, Iran.

³M.Sc., Faculty of Mechanics, Malek Ashtar University of Technology, Isfahan, Iran.

⁴Ph.D, Iran Aircraft Manufacturing Ind. Co., Isfahan, Iran.

⁵Ph.D, Faculty of Mechanics, Malek Ashtar University of Technology, Isfahan, Iran

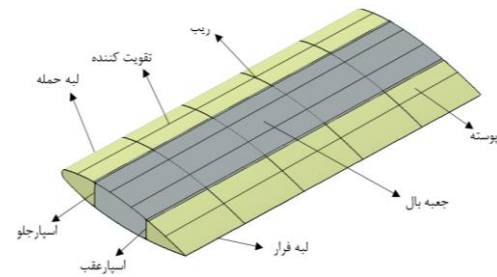
Abstract

Structure optimization in aerospace industries is of particular importance due to the need for light structures to reduce costs and increase flight performance. The main components of an airplane wing consist of spars, ribs and skin. At first, in this research a wing structure with two I-shaped spars, 6 ribs and a shell with specific geometric characteristics is modeled. By choosing aluminum alloy as the material of the structure and using the finite element method, the wing structure has been subjected to static loading and the maximum amount of stress and displacement of the wing box area has been obtained. Then, according to the results of the analysis and the optimization capability, the wing structure has been divided into three parts in order to optimize the thickness of the components along the length of the wing. By defining the thickness of the wing box components in all three parts as factors and stress and weight as the answers to the optimization problem through the method of designing experiments, which in this problem is the static analysis of the structure, the thickness of the components of the wing box area according to the goal of the lowest weight and the highest stress Optimization is allowed. The obtained results indicate that after the optimization, the weight of the wing box has decreased by 46.5%.

Keywords: Airplane wing structure; Wing box; Analysis; Optimization; Design of experiments.

۱- مقدمه

اجزای اصلی که طی فرآیند پرواز متحمل شدیدترین بارها می‌شوند، عموماً در بخش بال هواپیما قرار دارند. بال‌ها اجزای اصلی تأمین‌کننده نیروی برآ هستند و از لحاظ آیرودینامیکی طوری طراحی شده‌اند تا نیروی برآ موردنیاز پرواز را تأمین نمایند. به تیرک‌های طولی در بال اسپار^۱ و به تیغه‌های عرضی ریب^۲ گفته می‌شود. بال هواپیما به منظور تولید نیروی برآ دارای مقطعی است که به آن ایرفویل^۳ می‌گویند. بال‌ها به بدنه هواپیما متصل شده‌اند و محل اتصال را ریشه‌ی بال می‌نامند. ساختمان بال از نظر سازه‌ای از اجزایی شامل اسپار، ریب، پوسته و اجزای طولی تقویت‌کننده تشکیل شده است. به قسمت جلویی بال که مستقیماً هوا را می‌شکافد و اولین قسمتی است که در آغاز پرواز با هوا برخورد کرده و در فرایند تولید برآ شرکت دارد، لبه حمله و به قسمت انتهایی بال و آخرین نقطه‌ای که هوا پس از رد شدن از سطوح بالا و پایین بال از آن می‌گذرد، لبه فرار گفته می‌شود. ساختمان هر بال ممکن است، از یک یا چند اسپار مستقل تشکیل گردد، در این شرایط هر دو اسپار می‌توانند یک ساختار مستقل و قوی به نام جعبه اسپار یا جعبه‌بال تشکیل دهند که در این حالت اجزای سازه‌ای فرعی لبه حمله و لبه فرار بال به آن متصل می‌شوند. با توجه به نقش اساسی جعبه‌بال در تحمل وزن و بارهای وارد بر سازه، در این پژوهش به تحلیل و بهینه‌سازی این قسمت مهم از سازه بال پرداخته شده است. اجزای اصلی سازه بال در شکل ۱ نشان داده شده‌اند.



شکل ۱- اجزای سازه بال

بهینه‌سازی سازه‌ها و بهینه‌سازی چند موضوعی در سال‌های اخیر به طور فزاینده‌ای مورد توجه قرار گرفته است. این مطلب

به دلیل سهم زیاد بهینه‌سازی در ارتقا و پیشرفت طراحی‌ها به خصوص در مراحل اولیه طراحی محصولات است. گیرون و ماهه [۱] در سال ۱۹۹۹ در مطالعه خود یک عبارت ساده شده شامل هزینه کارکرد نیروهای پسا و وزن بال را بهینه کردند. تلاش آن‌ها دارای این مزیت برجسته بوده که به طور مستقیم کل مدل بال را شبیه‌سازی کرده و مورد تحلیل قرار دادند که این مطلب، طراح را قادر می‌سازد تا کارایی محصول را در مراحل اولیه فرایند تولید، بررسی کند. به عنوان روشی دیگر برای حل مسائل بهینه‌سازی چند حیطة^۴، گارسلون و بالابانوف [۲] در مقالات خود این مسائل را به دو مسئله بهینه‌سازی ساده و بهینه‌سازی آیرودینامیکی تقسیم نمودند. در این شیوه برای بهینه‌سازی کل مسئله یک الگوریتم طراحی شده است که در هر تکرار یکی از انواع مسئله را حل می‌کند، تا زمانی که معیار همگرایی از پیش تعیین شده ارضا شود. کروگ و همکاران از روش‌های بهینه‌سازی توپولوژی مبتنی بر انرژی برای طراحی ریب‌های جعبه‌بال هواپیما استفاده کردند [۳]. گائو و همکارانش در سال ۲۰۰۸ عملکرد دو نوع متفاوت از سوراخ‌ها و تقویت‌کننده‌های گوناگون در یک تیرک با سطح مقطع C شکل تحت بار برشی استاتیکی را بررسی کردند. در نتیجه این پژوهش نشان داد که برش لوزی شکل مزایای بهتری نسبت به برش دایره‌ای در مواد مرکب دارد [۴]. آینسورث و همکاران در سال ۲۰۱۰ بر روی مطالعات تجاری انجام شده بر روی ساختار جعبه بال هواپیما تمرکز کردند و جعبه بالی از روی یک جت حمل و نقل تجاری مدل کردند. پانل تقویت شده با استرینگر کلاه شکل کامپوزیت سبک‌ترین مفهوم برای ساختار جعبه بال است [۵]. ایمانول و همکاران در سال ۲۰۱۴ در مقاله‌ای یک جعبه‌بال از چهار ریب و دو اسپار برای تجزیه و تحلیل در نظر گرفتند. تنش خطی جعبه‌بال برای بارهای برشی معلوم با چندین مرتبه تکرار برای بهینه‌سازی طراحی جعبه‌بال و طراحی ریب‌های مختلف برای فرایند بهینه‌سازی انجام گرفته شده است و در نتیجه باعث کاهش ۳ درصدی وزن بال با طراحی جدید می‌شود [۶]. فرونی سوارس در سال ۲۰۱۵ با استفاده از روش المان محدود، تحلیل ساختاری جعبه‌بال همراه با ساخت یک مدل سه‌بعدی انجام داد که شرایط انتخابی را نشان می‌دهد، تحلیل المان محدود با کمک برنامه رایانه‌ای

⁴ Multi-field optimization

¹ Spar
² Rib
³ Airfoil

کامپوزیت ایمن تر و سبک تر از بال آلومینیومی به دست آمده است [۱۲].

در تحقیقات سال‌های گذشته، بهینه‌سازی و کاهش وزن سازه بال و ناحیه جعبه‌بال، اغلب براساس حذف بخش‌هایی از اجزای دارای تنش بسیار کم و انجام فرآیند سعی و خطا، استفاده از نرم‌افزارهای دارای قابلیت بهینه‌سازی یا برنامه‌نویسی بر طبق الگوریتم‌های بهینه‌سازی انجام گرفته است. همچنین تغییرات ضخامت اجزا در طول بال کمتر مورد تحلیل و بهینه‌سازی قرار گرفته است. در این پژوهش، ۱۲ فاکتور ضخامت اجزای بال در راستای طول آن جهت بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است. با توجه به زمان بر بودن و دقت پایین فرآیند سعی و خطا و همچنین پیچیدگی استفاده از کدنویسی برای بهینه‌سازی، در این پژوهش با استفاده از روش بهینه‌سازی طراحی آزمایش‌ها که یک روش تحلیل آماری با دقت مناسب و زمان کم است، فاکتورهای ضخامت، بهینه‌سازی گردیده است. با استفاده از این روش یک شیوه جدید و کمتر استفاده شده برای بهینه‌سازی سازه بال تعریف شده است.

۲- انتخاب ماده

با توجه به مزیت‌های آلیاژهای آلومینیوم که می‌توان به وزن پایین، شکل‌پذیری خوب، تولید آسان، مقاومت در برابر خوردگی، قدرت بالا در برابر خستگی و قدرت بالا در برابر ترک خوردگی ناگهانی اشاره کرد، آلیاژ AL7075(T651) به عنوان ماده سازه بال در نظر گرفته شده است. برخی خواص مکانیکی این آلیاژ در جدول ۱ بیان گردیده است.

جدول ۱- برخی از خواص مکانیکی آلیاژ AL7075(T651)

مقدار	خواص
2810	چگالی (kg/m ³)
71700	مدول الاستیسیته (MPa)
0.33	ضریب پواسون
572	استحکام تنش نهایی (MPa)
503	استحکام تنش تسلیم (MPa)
331	استحکام برشی (MPa)

نسترن^۱ انجام گرفته است. نتایج برای توضیح تأثیر بارهای اعمال شده بر روی رفتار ساختاری سازه اصلی بال نشان می‌دهد که تنش فشاری بالای بال و تنش کششی در پایین بال بحرانی‌ترین مقدار را دارا هستند و هر دو عمل به طور عمده در پوشش بال قرار دارند و بیشترین تنش‌ها در نزدیکی منطقه (شبه‌سازی شده) اتصال به بدنه، رخ می‌دهد که به منظور بهبود شرایط تمرکز تنش، تقویت‌کننده‌های T شکل به پوسته‌های بال اضافه نمود [۷]. پوجاری و پاتیل در سال ۲۰۱۶ جعبه‌بال هواپیمایی را با استفاده از تحلیل استاتیک خطی به کمک نرم‌افزار المان محدود نسترن شبه‌سازی و آنالیز تنش و خستگی اجزای آن را انجام دادند؛ همچنین بهینه‌سازی وزن برای اسپارها و ریب‌ها با ایجاد بریدگی بر روی آن‌ها انجام گرفته است که باعث کاهش وزن ۷/۸۵ درصدی هواپیما می‌شود [۸]. در سال ۱۳۸۴ سیف به بهینه‌سازی ابعادی اجزای بال هواپیما جت برای کمینه‌کردن وزن آن، تحت بارهای آیرودینامیکی در شرایط استاتیکی پرداخت. در این تحقیق از نرم‌افزار انسیس^۲ برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی به صورت پارامتری کمک گرفت و نتایج بدست آمده را با داده‌های صنعتی مورد تایید قرارداد [۹]. در سال ۱۳۹۲ بهشت‌آیین با استفاده از نقشه بال هواپیما مسافری ایرباس ۳۲۰ و به کمک نرم‌افزار کتیا، مدل‌سازی بال را انجام داده است؛ همچنین تحلیل استاتیکی و ارتعاش آزاد سازه بال با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس جهت محاسبه تنش و تغییر مکان انجام شده است [۱۰]. ضامنی در سال ۱۳۹۳ به مدلسازی، تحلیل آیرودینامیکی، تحلیل استاتیکی و تحلیل قابلیت اعتماد سازه بال هواپیمای ایرباس ۳۲۰ به کمک نرم‌افزار انسیس پرداخته است. در بررسی تأثیر ترک در قابلیت اعتماد تیر مشخص شده است که هر چه ترک به ریشه بال نزدیک باشد تنش ماکزیمم افزایش یافته و قابلیت اعتماد تیر کاهش می‌یابد [۱۱]. سعادتی و شهرآبادی در سال ۱۳۹۵ بال یک هواپیما (که از جنس آلومینیوم است) را در نرم‌افزار کتیا^۳ مدل‌سازی کردند و در نرم‌افزار آباکوس تحت بارگذاری‌های استاتیکی، دینامیکی و ارتعاشی قرار دادند. نتایج به دست آمده نشان از استحکام بالاتر بال کامپوزیتی از بال آلومینیومی دارد، در حالی که وزن بال به طور چشم‌گیری کاهش یافته است؛ در نتیجه بال در نظر گرفته شده با این نوع

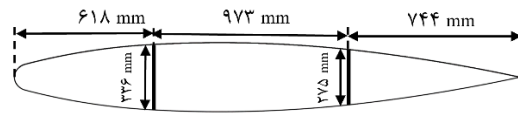
³ Catia

¹ Nastran

² Ansys

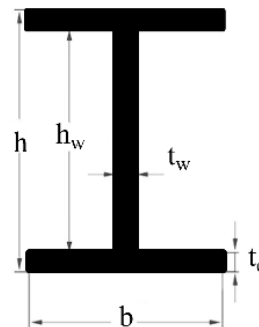
۳- مشخصات هندسه و ابعاد سازه بال

در این پژوهش سازه بالی که ناحیه جعبه‌بال آن مورد بررسی قرار گرفته دارای دو اسپار I شکل، شش عدد ریب و پوسته است. فاصله بین ریب‌ها ۱۰۴۰ میلی‌متر و طول بال ۵۲۰۰ میلی‌متر است. ارتفاع اسپارها، فاصله لبه حمله تا اسپار جلو، فاصله لبه فرار تا اسپار عقب و فاصله میان دو اسپار در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- ایرفول بال

در یک اسپار I شکل، به قسمت بالا و پایین آن، کپ و به مقطع عمودی آن وب گفته می‌شود. نام‌گذاری ابعاد مقطع اسپارها در شکل ۳ نشان داده شده است؛ همچنین ابعاد مقطع اسپارهای I شکل و ضخامت اجزای سازه بال در جدول ۲ بیان گردیده است.



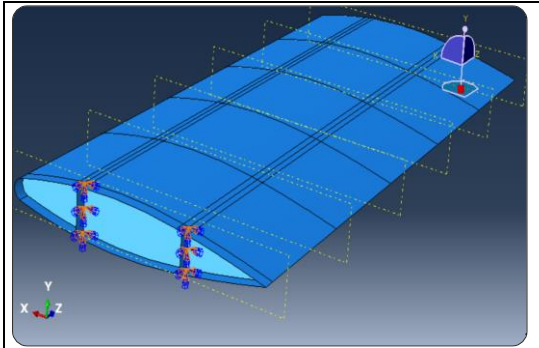
شکل ۳- نام‌گذاری ابعاد مقطع اسپارها

جدول ۲- ابعاد و ضخامت اجزای سازه بال

اجزای سازه	نماد	ابعاد و ضخامت	مقدار (mm)
اسپار	b_1	پهنای کپ اسپار جلو	۱۰۰
	b_2	پهنای کپ اسپار عقب	۱۰۰
	t_{c1}	ضخامت کپ اسپار جلو	۱۰
	t_{c2}	ضخامت کپ اسپار عقب	۱۲
	h_{w1}	ارتفاع وب اسپار جلو	۳۱۶
	h_{w2}	ارتفاع وب اسپار عقب	۲۵۱
پوسته	t_{w1}	ضخامت وب اسپار جلو	۴/۵
	t_{w2}	ضخامت وب اسپار عقب	۴
پوسته	t_{skin}	ضخامت پوسته	۵
ریب	t_R	ضخامت ریب	۲/۵

۴- تحلیل استاتیکی

در تحلیل استاتیکی فرض بر این است که بال در حالت تعادل قرار دارد و بار خارجی به صورت استاتیکی و پیوسته بر آن اعمال می‌گردد. ابتدا سازه بال به کمک نرم افزار کتیا و در محیط طراحی شکل به صورت سطح مدل‌سازی و سپس مدل به صورت یک قطعه واحد وارد نرم‌افزار آباکوس گردیده است. سازه بال را می‌توان به عنوان یک سازه جدار نازک محسوب کرد. به همین دلیل در کل سازه المان پوسته به کار برده شده است. با توجه به استفاده از المان پوسته، ضخامت هر یک از اجزای سازه بال از طریق گزینه‌ی ایجاد مقطع در نرم‌افزار آباکوس وارد گردیده است. از حلگر استاتیک جنرال با زمان حل یک ثانیه برای انجام این تحلیل استفاده شده است؛ همچنین از المان چهاروجهی خطی و با تکنیک آزاد مش‌ریزی سازه بال انجام گرفته است. برای تعیین شرایط مرزی، مقطع اسپارها در ریشه بال گیردار (تمام درجه‌های آزادی بسته) گردیده است. برای به دست آمدن نتایج صحیح به طول اسپار و پوسته در ریشه بال به میزان ۱ سانتی‌متر اضافه شده و شرایط مرزی در مقطع وب اسپار ریشه مانند شکل ۴ ایجاد شده است.



شکل ۴- شرایط مرزی سازه بال

جهت بارگذاری سازه، ابتدا بر روی مرکز جرم الاستیک ریب‌ها که ۱۰ درصد نزدیکتر به لبه حمله بال است، نقاط مرجع ایجاد گردیده است. سپس با استفاده از قید کوپلینگ نقاط مرجع بر روی هر ریب به چهار نقطه مشترک اجزاء مطابق شکل ۵ کوپل گردیده است. در نهایت بارهای وارده بر سازه بال طبق جدول ۳ به نقاط مرجع ریب‌ها وارد گردیده است.

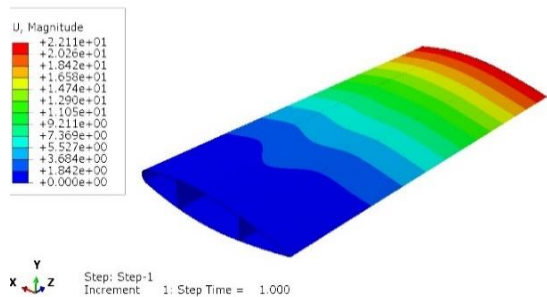
این سازه به عنوان یک تیر یک سرگیردار، بیشترین مقدار جابه‌جایی حل تحلیلی از طریق فرمول (۱) محاسبه شده و با بیشترین مقدار جابه‌جایی حاصل از نرم‌افزار آباکوس مقایسه شده است که اختلاف نتایج در جدول ۴ بیان گردیده است.

$$y = \frac{FL^3}{3EI} \quad (1)$$

در فرمول (۱) مقدار نیروی متمرکز که برابر ۱۵۰۰۰ نیوتن، طول بال و دارای مقدار ۵۲۰۰ میلی‌متر، E مدول الاستیسیته ماده به کار برده شده در سازه، I گشتاور دوم سطح سازه که از طریق روابط مربوطه به دست می‌آید، ولی به دلیل پیچیدگی این سازه با کمک از نرم‌افزار اتوکد مقدار آن محاسبه شده است و y مقدار جابه‌جایی نوک سازه بال است. شکل ۷ جابه‌جایی سازه بال مدل شده جهت اعتبارسنجی را نشان می‌دهد.

جدول ۴- اختلاف جابه‌جایی روش تحلیلی و آباکوس

روش	بیشترین جابه‌جایی
تحلیلی	۲۲/۸۲ mm
نرم‌افزار آباکوس	۲۲/۱۱ mm
درصد اختلاف	۳/۱

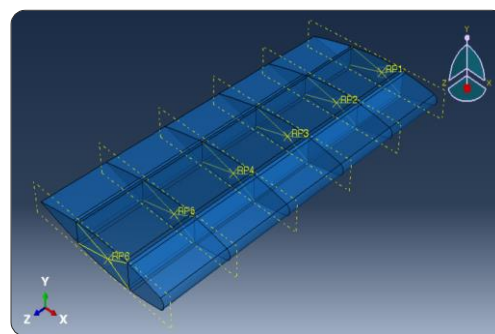


شکل ۷- جابه‌جایی سازه بال مدل شده جهت اعتبارسنجی

با توجه به درصد اختلاف کم میان نتایج روش تحلیلی و روش نرم‌افزار آباکوس، اعتبار مدل سازه بال مورد تایید قرار گرفته است. تنش به دست آمده برای سازه بال و ناحیه‌ی جعبه‌بال در جدول ۵ قابل مشاهده است.

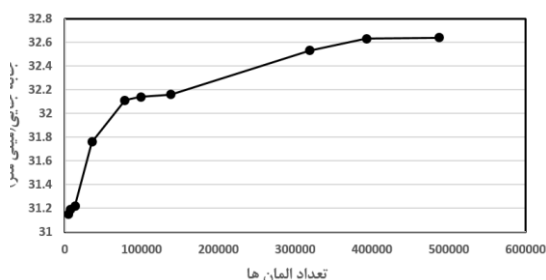
جدول ۳- مقادیر بارهای وارد بر سازه بال

ناحیه	$F_x(N)$	$F_y(N)$	$F_z(N)$	$M_x(N.m)$
ریب ۱ (ریشه بال)	-۶۵۴/۵	۱۰۲۰۱/۴	۱۷۱/۸	۱۱۸۷/۱
ریب ۲	-۱۷۸۱/۷	۱۰۴۹۶/۳	۵۶۵/۱	۱۵۰۳/۲
ریب ۳	۸۷۳/۱	۷۵۴۸/۶	۶۷۴/۱	۳۱۰۷/۷
ریب ۴	-۶۰۴/۲	۱۰۴۱/۷	۴۵۴/۶	۷۴۲۸/۶
ریب ۵	۲۵/۸	۲۵۰۷/۵	۵۵۰/۸	۴۶۰۰/۱
ریب ۶ (نوک بال)	۱۶۴/۹	۱۵۱۴۳	۴۰۱/۷	۶۳/۶



شکل ۵- قید کوپلینگ بر روی هر ریب

پس از انجام تحلیل استاتیکی، برای مستقل بودن نتایج تحلیل از تعداد المان‌ها، همگرایی برای مقادیر جابه‌جایی عمودی نوک سازه بال صورت گرفته است که در شکل ۶ قابل مشاهده است.



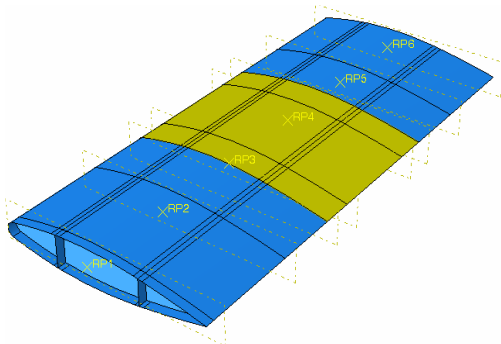
شکل ۶- جابه‌جایی ناحیه نوک بال برحسب تعداد المان‌ها

تعداد المان‌های همگرا شده برای سازه بال برابر ۳۱۸۶۳۴ المان است. به منظور اطمینان از صحت روش المان محدود، مدل سازه بال اعتبارسنجی شده است. این اعتبارسنجی با مقایسه نتایج بیشترین جابه‌جایی حاصل از نرم‌افزار آباکوس و حل تحلیلی سازه بال مورد مطالعه بدون ریب‌ها با یک نیروی متمرکز در نوک بال بررسی شده است. با توجه به در نظر گرفتن

با توجه به نتایج بدست آمده مقدار بیشترین تنش در سازه بال و جعبه بال یکسان است، بنابراین جعبه بال بیشترین تنش را در سازه بال تحمل می‌کند؛ همچنین با توجه به این که در نواحی دور از ریشه، تنش بسیار کمی وارد شده است و در نواحی نزدیک به ریشه بال نیز مقدار بیشترین تنش برابر ۳۵۴/۱ مگاپاسگال است فاصله دارد، قابلیت بهینه‌سازی ضخامت اجزای جعبه‌بال در طول بال وجود دارد.

۵- بهینه‌سازی ابعاد

بهینه‌سازی ابعاد شامل بهبود سطح مقطع یا ضخامت المان‌های مشخصی از سازه خواهد بود. در این پژوهش جهت بهینه‌سازی ضخامت اجزای جعبه‌بال، سازه بال مطابق شکل ۱۲ به سه قسمت مساوی تقسیم گردیده است.



شکل ۱۲- تقسیم سازه بال به سه قسمت مساوی

فاکتورها یا متغیرهای بهینه‌سازی برای هر قسمت جعبه‌بال طبق جدول ۶ نام‌گذاری گردیده است. در مجموع ۱۲ فاکتور ضخامت وجود دارد.

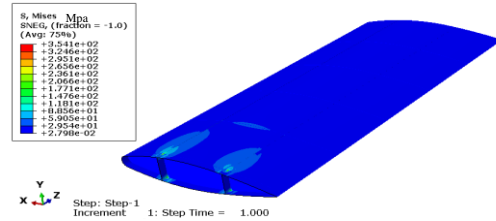
جدول ۶- نام‌گذاری فاکتورهای بهینه‌سازی جعبه‌بال

فاکتور	ناحیه جعبه‌بال		
	نزدیک ریشه	وسط بال	نزدیک نوک
ضخامت ریب	Rib1	Rib2	Rib3
ضخامت پوسته	Skin1	Skin2	Skin3
ضخامت کپ	Cap Spar1	Cap Spar2	Cap Spar3
ضخامت وب	Web Spar1	Web Spar2	Web Spar3

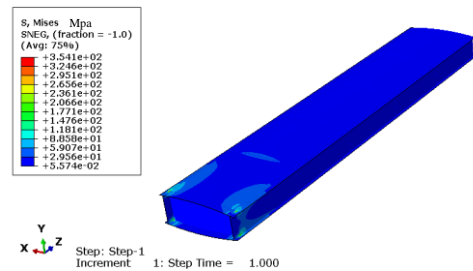
جدول ۵- بیشترین تنش و جابجایی سازه و جعبه بال

ناحیه	بیشترین جابجایی (mm)	بیشترین تنش (Mpa)
سازه بال	۲۵/۸۳	۴۶۷/۶
جعبه‌بال	۲۵/۵۰	۴۶۷/۶

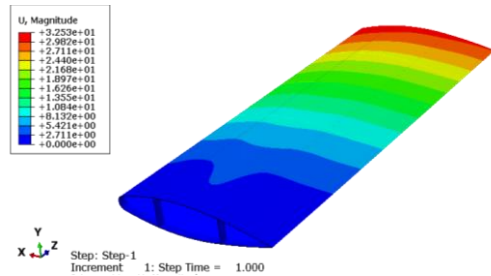
توزیع تنش و جابه‌جایی در سازه بال و ناحیه‌ی جعبه‌بال در شکل‌های ۸ تا ۱۱ قابل مشاهده است.



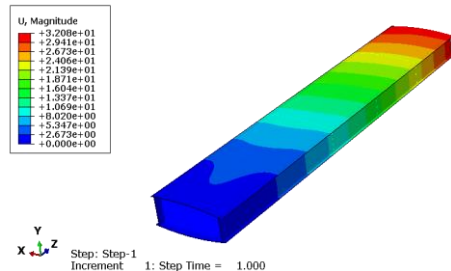
شکل ۸- توزیع تنش در سازه بال



شکل ۹- توزیع تنش در جعبه‌بال



شکل ۱۰- توزیع جابه‌جایی عمودی در سازه بال



شکل ۱۱- توزیع جابه‌جایی عمودی در جعبه‌بال

جدول ۸- درصد جرمی اجزای جعبه‌بال بهینه نشده

درصد جرمی	جرم	جعبه‌بال
۱۰۰	۲۸۰/۶	جرم کل
۵۷/۷۳	۱۶۲	پوسته
۵/۰۶	۱۴/۲	ریب‌ها
اسپار		
جلو		
۱۰/۶۲	۲۹/۸	کپ
۸/۰۲	۲۲/۵	وب
۱۸/۶۴	۵۲/۳	کل
عقب		
۱۲/۷۲	۳۵/۷	کپ
۵/۸۵	۱۶/۴	وب
۱۸/۵۷	۵۲/۱	کل
۳۷/۲۱	۱۰۴/۴	کل

۶- طراحی آزمایش‌ها

طراحی آزمایش‌ها یک روش تحلیلی آماری برای مدل‌سازی و بررسی اثر متغیرهای ورودی یک فرآیند بر یک یا تعدادی از متغیرهای خروجی است که تابع ناشناخته‌ای از متغیرهای ورودی هستند [۱۳]. باید توجه داشت، در این پژوهش تحلیل سازه در نرم‌افزار آباکوس، همان آزمایشات در روش طراحی آزمایش‌ها است. بعد از طراحی و انجام آزمایش‌ها، برای تحلیل داده‌ها از روش آنالیز واریانس استفاده می‌شود. در این روش با استفاده از محاسبه واریانس و آزمون فرضیه‌ها با روش آزمون طرح عاملی^۱، فاکتورهای مؤثر و همچنین اثر تعامل‌های مهم مشخص می‌شوند. در روش طراحی آزمایش‌ها زمانی که تعداد فاکتورهای بهینه‌سازی زیاد باشد، تعداد آزمایشات نیز بیشتر می‌گردد و به تبع آن زمان و هزینه بیشتری برای حل مسئله باید صرف گردد، به همین دلیل در این روش برای کاهش تعداد آزمایشات، ابتدا از طریق روش غربال‌گری، فاکتورهای مؤثر بر پاسخ‌های مسئله شناسایی و با تعداد آزمایشات کمتری بهینه‌سازی مسئله انجام می‌پذیرد. به دلیل حجم بالای محاسبات در تحلیل داده‌ها، نرم‌افزارهای مختلفی برای این روش به وجود آمده که استفاده از آن را آسان نموده است. در این پژوهش از نرم‌افزار مینی‌تب^۲ استفاده شده است. در نرم‌افزار مینی‌تب پس از آنالیز آزمایش‌های طراحی شده، به همراه نتایج، نمودارها و جداولی ارائه می‌گردد که براساس معیارهای زیر، نتایج اعتبارسنجی می‌گردند [۱۴].

با توجه به طراحی ضخامت اجزای سازه بال از طریق روابط و نمودارهای طراحی سازه‌های هوایی و نتایج تحلیل جعبه‌بال محدوده یا قیدی برای هر یک از فاکتورهای بهینه‌سازی طبق جدول ۷ مشخص گردیده است.

جدول ۷- قیود فاکتورهای بهینه‌سازی جعبه‌بال

فاکتور	محدوده (mm)	فاکتور	محدوده (mm)
Rib1	۱/۵ تا ۲/۵	Cap Spar1	۹ تا ۱۲
Rib2	۱/۲ تا ۲	Cap Spar2	۸ تا ۱۱
Rib3	۱ تا ۱/۵	Cap Spar3	۷ تا ۱۰
Skin1	۵ تا ۲/۵	Web Spar1	۲۵ تا ۴/۵
Skin2	۳/۵ تا ۲	Web Spar2	۲ تا ۳/۵
Skin3	۱/۵ تا ۳	Web Spar3	۱/۵ تا ۳

توابع هدف یا پاسخ‌های مدنظر برای بهینه‌سازی ضخامت اجزای جعبه‌بال، تنش و وزن است. در این پژوهش هدف کمینه کردن وزن جعبه‌بال بدون تجاوز از معیارهای حداکثر تنش مجاز است. یک سازه در صورتی بهینه است که از تمام مولکول‌های آن حداکثر استفاده شده باشد، به عبارتی تمام سطح ماده به حداکثر تنش مجاز خود برسد و یا از دیدگاه انرژی تمام سطح ماده حداکثر انرژی کرنشی ممکن را در خود ذخیره کند؛ بنابراین در وضعیت بهینه، جعبه‌بال حداکثر تنش مجاز را دارا است. در این مسئله بیشترین تنش مجاز براساس ضریب اطمینان ۱/۵ که اغلب در سازه‌های هوایی در نظر گرفته می‌شود و تنش تسلیم ماده انتخابی از طریق فرمول (تنش مجاز / تنش تسلیم = ضریب اطمینان) محاسبه گردیده است. براین اساس هدف بهینه‌سازی جعبه‌بال، داشتن کمترین وزن و بیشترین تنش ون مایز مجاز است که مقدار آن با قراردادن در فرمول ضریب اطمینان برابر ۳۳۵/۳۳ مگاپاسگال به دست آمده است. نحوه توزیع جرم در اجزای جعبه‌بال قبل از بهینه‌سازی در جدول ۸ قابل مشاهده است.

² Minitab

¹ Factorial design test

طبقات به صورت ستون‌های به هم چسبیده نمایش داده می‌شود. با استفاده از نمودار هیستوگرام و با رسم منحنی توزیع نرمال می‌توان از شکل توزیع از لحاظ نرمال بودن، وضعیت چولگی و کشیدگی متغیر مورد نظر اطلاع پیدا کرد. ابتدا در نرم‌افزار مینی‌تب از طریق روش غربالگری پلاکت برمان^۱، ۲۸ آزمایش طراحی شده است. طراحی پلاکت برمان نوعی طراحی عاملی کسری دو سطحی با وضوح (تفکیک) ۳ است و برهم کنش‌های دوتایی بررسی نمی‌شود. این طراحی برای تعداد فاکتورهای با ضریب ۴ یا ۸ به کار می‌رود. سپس آزمایش‌ها که همان تحلیل سازه بال است، به صورت جداگانه انجام گرفته و نتایج تحلیل‌ها که بیشترین تنش در جعبه‌بال و وزن جعبه‌بال است، در ستون پاسخ‌های هر یک از آزمایش‌ها وارد گردیده است. در جدول ۹ این آزمایش‌ها قابل مشاهده است. پس از آنالیز داده‌ها، مدل‌های ارائه گردیده برای تنش و وزن بررسی و براساس معیارهای بیان شده اعتبار مدل تایید گردیده است. سپس طبق نمودارهای پارتو که در شکل ۱۳ قابل مشاهده است، فاکتورهای مؤثر بر تنش و وزن جعبه‌بال مشخص گردیده است. از نمودار پارتو برای تعیین بزرگی و اهمیت اثرات استفاده می‌گردد. در نمودار پارتو، میله‌هایی که از خط مرجع عبور می‌کنند، از نظر آماری معنی‌دار یا مؤثر هستند. از بین ۱۲ فاکتور بهینه‌سازی جعبه‌بال سه فاکتور مؤثر بر تنش و هر دوازده فاکتور مؤثر بر وزن جعبه‌بال است. در جدول ۱۰ فاکتورهای مؤثر به همراه ترتیب اثرگذاری بیان گردیده است.

جدول ۱۰- فاکتورهای مؤثر بر تنش و وزن جعبه‌بال

فاکتور	تنش (ترتیب اثرگذاری)	وزن (ترتیب اثرگذاری)
Rib1	-	اثرگذار (۱۰)
Rib2	-	اثرگذار (۱۱)
Rib3	-	اثرگذار (۱۲)
Skin1	اثرگذار (۲)	اثرگذار (۱)
Skin2	-	اثرگذار (۲)
Skin3	-	اثرگذار (۳)
Cap Spar1	اثرگذار (۳)	اثرگذار (۵)
Cap Spar2	-	اثرگذار (۷)
Cap Spar3	-	اثرگذار (۶)
Web Spar1	اثرگذار (۱)	اثرگذار (۴)
Web Spar2	-	اثرگذار (۸)

✓ در جدول آنالیز واریانس، اگر مقدار P-Value مربوط به مدل کوچکتر از ۰/۰۵ نتایج مناسب و مورد تایید است.

✓ در جدول خلاصه مدل، سه نوع R^2 یا ضریب همبستگی وجود دارد که معیاری برای بیان برازش مدل با داده‌های حاصل از آزمایش‌ها است. هر چه مقادیر این ضرایب به یک نزدیکتر باشد، مدل ارائه شده قوی و دقیق‌تر است.

✓ برای بررسی صحت فرض نرمال بودن توزیع داده‌ها، نمودارهای باقیمانده که شامل نمودار احتمال نرمال، نمودار هیستوگرام، نمودارهای باقیمانده در برابر مقادیر برازش شده و زمان است بررسی می‌گردند. در نمودار احتمال نرمال، توزیع مقادیر باید بر روی خط مربوطه یا نزدیک به خط باشند، در نمودار هیستوگرام توزیع مقادیر باید شکلی نزدیک به زنگوله داشته باشند و در نمودارهای باقیمانده در برابر مقادیر برازش شده و زمان توزیع مقادیر نباید از روند خاصی تبعیت کنند.

با توجه به استفاده از عبارات و اصطلاحات تحلیل آماری، برخی از این موارد در زیر به صورت مختصر تعریف شده است:

✓ واریانس: یک مفهوم آماری است که نشان می‌دهد مقادیر یک متغیر تصادفی چگونه حول میانگین آن توزیع شده‌اند و مقدار آن براساس متوسط مربع اختلاف مقادیر از میانگین بدست می‌آید.

✓ مقدار P-Value: مقداری که برابر با میزان انحراف معیاری از میانگین است که مقادیر بزرگتر از آن نشان دهنده‌ی احتمال خطا می‌باشد.

✓ ضریب همبستگی: ابزاری آماری برای تعیین نوع و درج رابطه یک متغیر کمی با متغیر کمی دیگر است. ضریب همبستگی، یکی از معیارهای مورد استفاده در تعیین همبستگی دو متغیر است. ضریب همبستگی شدت رابطه و همچنین نوع رابطه (مستقیم یا معکوس) را نشان می‌دهد. این ضریب بین ۱ تا -۱ است و در صورت عدم وجود رابطه بین دو متغیر، برابر صفر است.

✓ نمودار هیستوگرام: نمایشی از توزیع داده‌های کمی پیوسته است که می‌تواند تخمینی از توزیع احتمال باشد. به عبارتی به نوع خاصی از نمودار ستونی که در آن داده‌های عددی بر اساس تعداد دفعات تکرار نمایش داده می‌شوند، گفته می‌شود. در این نمودار فراوانی یا درصد فراوانی هر کدام از

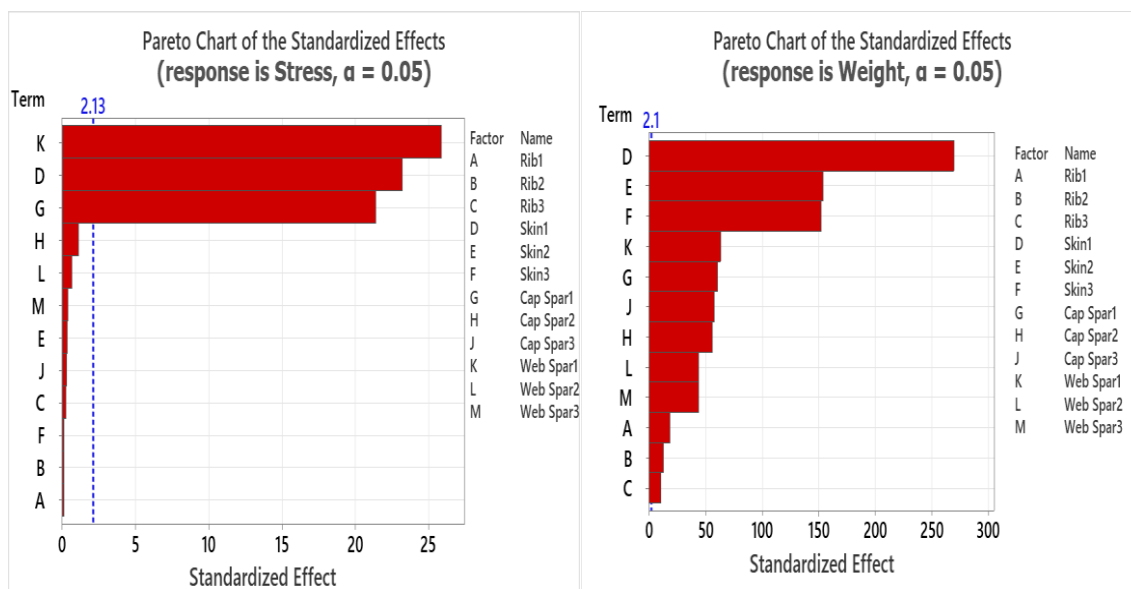
¹ Plackett-burman

جدول ۹- آزمایش‌های غربالگری پلاکت برمان

Weight (Kg)	Stress (MPa)	Web Spar 3	Web Spar 2	Web Spar 1	Cap Spar 3	Cap Spar 2	Cap Spar 1	Skin3	Skin2	Skin1	Rib3	Rib2	Rib1	Run
191	443/2	1/5	3/5	2/5	10	11	12	3/0	3/5	2/5	1/0	1/2	1/5	1
207	335/1	3/0	2/0	4/5	10	8	12	3/0	2/0	5/0	1/0	2/0	2/5	2
204	437/3	1/5	3/5	2/5	7	8	9	3/0	3/5	5/0	1/5	1/2	2/5	3
205	375/6	1/5	2/0	4/5	7	8	9	3/0	3/5	5/0	1/5	2/0	1/5	4
158	441/5	3/0	2/0	2/5	10	8	12	1/5	2/0	2/5	1/5	2/0	2/5	5
192	503/0	3/0	3/5	2/5	10	11	9	3/0	3/5	2/5	1/5	1/2	2/5	6
206	335/8	1/5	3/5	4/5	7	11	12	1/5	3/5	5/0	1/5	2/0	1/5	7
203	384/1	3/0	2/0	2/5	10	11	12	3/0	2/0	5/0	1/0	1/2	1/5	8
171	430/5	3/0	2/0	4/5	10	8	9	1/5	3/5	2/5	1/5	1/2	1/5	9
205	335/6	1/5	2/0	4/5	10	11	12	1/5	3/5	5/0	1/0	1/2	1/5	10
172	428/6	3/0	2/0	4/5	7	11	9	1/5	3/5	2/5	1/0	1/2	2/5	11
184	375/0	1/5	3/5	4/5	10	8	9	1/5	2/0	5/0	1/0	1/2	2/5	12
181	439/3	3/0	3/5	2/5	7	11	9	1/5	2/0	5/0	1/0	2/0	1/5	13
170	443/3	3/0	3/5	2/5	7	8	12	1/5	3/5	2/5	1/0	2/0	1/5	14
196	382/7	1/5	2/0	2/5	10	8	12	1/5	3/5	5/0	1/5	1/2	2/5	15
137	503/0	1/5	2/0	2/5	7	8	9	1/5	2/0	2/5	1/0	1/2	1/5	16
211	335/2	3/0	3/5	4/5	7	11	12	3/0	2/0	5/0	1/5	1/2	2/5	17
181	384/3	3/0	3/5	2/5	7	8	12	1/5	2/0	5/0	1/5	1/2	1/5	18
204	437/1	3/0	2/0	2/5	7	8	9	3/0	3/5	5/0	1/0	2/0	2/5	19
211	374/7	3/0	3/5	4/5	10	11	9	1/5	3/5	5/0	1/0	2/0	2/5	20
172	379/3	1/5	3/5	4/5	7	8	12	3/0	2/0	2/5	1/0	1/2	2/5	21
171	431/1	1/5	3/5	4/5	10	8	9	3/0	2/0	2/5	1/0	2/0	1/5	22
195	439/1	1/5	2/0	2/5	10	11	9	3/0	2/0	5/0	1/5	2/0	1/5	23
160	379/0	1/5	2/0	4/5	7	11	12	1/5	2/0	2/5	1/5	2/0	2/5	24
199	380/4	3/0	3/5	4/5	10	8	12	3/0	3/5	2/5	1/5	2/0	1/5	25
171	430/7	3/0	2/0	4/5	7	11	9	3/0	2/0	2/5	1/5	1/2	1/5	26
184	441/2	1/5	2/0	2/5	7	11	12	3/0	3/5	2/5	1/0	2/0	2/5	27
158	503/0	1/5	3/5	2/5	10	11	9	1/5	2/0	2/5	1/5	2/0	2/5	28

اثرگذار (۹)

Web Spar3



شکل ۱۳- نمودارهای پارتو فاکتورهای تنش و وزن جعبه‌بال

- ✓ نمودارهای باقیمانده در برابر مقادیر برازش شده و زمان در شکل ۱۴ از روند خاصی تبعیت نکرده‌اند.
- ✓ مقادیر نمودارهای احتمال نرمال در شکل ۱۴ در نزدیکی خط مربوط قرار گرفته‌اند.
- ✓ نمودارهای هیستوگرام در شکل ۱۴ شبیه به زنگوله است.

جدول ۱۲- ضرایب همبستگی

s	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
تنش	۹۹٪/۵۹	۹۸٪/۸۴	۹۳٪/۳۹
وزن	۹۹٪/۹۵	۹۹٪/۸۷	۹۹٪/۲۷

جدول ۱۳- آنالیز واریانس تنش

source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	۹	۲۰۸۶۱/۱	۲۳۱۷/۹۰	۱۳۳/۹۶	.
Linear	۳	۲۰۵۹۵/۳	۶۸۶۵/۰۶	۳۹۶/۷۴	.
Skin1	۱	۶۶۹۹/۰	۶۶۹۹/۰۳	۳۸۷/۱۵	.
Cap Spar1	۱	۶۷۹۷/۸	۶۷۹۷/۷۸	۳۹۲/۸۶	.
Web Spar1	۱	۷۰۹۸/۴	۷۰۹۸/۳۶	۴۱۰/۱۳۳	.
Squar	۳	۱۴۰/۳	۴۶/۷۷	۲/۷۰	۰/۱۵۶
Skin1*Skin1	۱	۲/۵	۲/۵۱	۰/۱۵	۰/۷۱۹
Cap Spar1*Cap Spar1	۱	۶۶/۷	۶۶/۶۹	۳/۸۵	۰/۱۰۷
Web Spar1* Web Spar1	۱	۸۴/۳	۸۴/۱۹	۴/۸۷	۰/۰۷۹
2-Way Intraction	۳	۱۲۵/۶	۴۱/۸۸	۲/۴۲	۰/۱۸۲
Skin1*Cap Spar1	۱	۴۴/۲	۴۴/۲۲	۲/۵۶	۰/۱۷۱
Skin1* Web Spar1	۱	۸۱/۰	۸۱/۰	۴/۶۸	۰/۰۸۳
Cap Spar1* Web Spar1	۱	۰/۴	۰/۴۲	۰/۰۲	۰/۸۸۲
Error	۵	۸۶/۵	۱۷/۳۰		
Lack-of-Fit	۳	۸۶/۵	۲۸/۸۴	*	*
Pure Error	۲	۰/۰	۰/۰		
Total	۱۴	۲۰۹۴۷/۶			

جدول ۱۴- آنالیز واریانس وزن

source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	۹	۱۶۵۰/۹۸	۱۸۳/۴۴	۱۲۲۲/۹۵	.
Linear	۳	۱۶۴۷/۷۵	۵۴۹/۲۵	۳۶۶۱/۶۷	.
Skin1	۱	۱۴۸۵/۱۲	۱۴۸۵/۱۲	۹۹۰/۸۳	.
Cap Spar1	۱	۸۴/۵۰	۸۴/۵۰	۵۴۲/۳۳	.
Web Spar1	۱	۷۸/۱۳	۷۸/۱۳	۵۲۰/۸۳	.
Squar	۳	۱/۹۸	۰/۶۶	۴/۴۱	۰/۰۷۲
Skin1*Skin1	۱	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۳۸	۰/۵۶۲
Cap Spar1*Cap Spar1	۱	۱/۴۴	۱/۴۴	۹/۶۲	۰/۰۲۷
Web Spar1* Web Spar1	۱	۰/۵۲	۰/۵۲	۳/۴۶	۰/۱۲۲
2-Way Intraction	۳	۱/۲۵	۰/۴۲	۲/۷۸	۰/۱۵۰
Skin1*Cap Spar1	۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰
Skin1* Web Spar1	۱	۰/۲۵	۰/۲۵	۱/۶۷	۰/۲۵۳
Cap Spar1* Web Spar1	۱	۱/۰۰	۱/۰۰	۶/۶۷	۰/۰۴۹
Error	۵	۰/۷۵	۰/۱۵		
Lack-of-Fit	۳	۰/۷۵	۰/۲۵	*	*
Pure Error	۲	۰/۰	۰/۰		
Total	۱۴	۱۶۵۱/۷۳			

سپس از طریق روش طراحی آزمایش باکس بنکن ۱۵ آزمایش برای بهینه‌سازی فاکتورهای مؤثر طراحی گردیده است. طراحی باکس بنکن از روش‌های طراحی سطح پاسخ است که به دلیل تعداد آزمایشات کمتر در طراحی تا ۴ فاکتور مورد توجه قرار دارد. این تکنیک یک طراحی عاملی سه سطحی است. در این روش یک بلوک آزمایشات دو سطحی در بین مجموعه مختلفی از متغیرها تکرار می‌شود. این طرح برای حل مشکل تعداد زیاد آزمایشات (نمونه‌ها) در طراحی با تعداد فاکتور زیاد ارائه شده است. تعداد آزمایشات به گونه‌ای ثابت نگه داشته می‌شود که برای تخمین ضرایب معادله درجه دوم نیز کافی باشد. از آنجا که هدف بهینه‌سازی کمینه کردن وزن است، فاکتورهای غیر مؤثر بر تنش در کمترین مقدار خود قرار گرفته است. سپس ۱۵ تحلیل سازه انجام گرفته و بیشترین تنش و وزن جعبه‌بال در ستون‌های مربوطه وارد گردیده است. در جدول ۱۱ این آزمایش‌ها قابل مشاهده است.

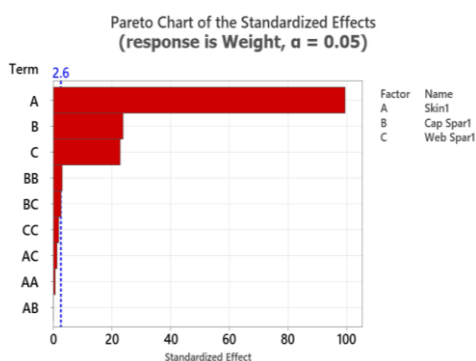
جدول ۱۱- آزمایش‌های باکس بنکن

Weight (Kg)	Stress (MPa)	Web Spar1	Cap Spar1	Skin1	Run
141	476/ 7	2/ 5	10/ 5	2/ 50	1
147	403/ 8	4/ 5	10/ 5	2/ 50	2
141	469/ 5	3/ 5	9/ 0	2/ 50	3
168	405/ 2	3/ 5	9/ 0	5/ 00	4
168	409/ 6	2/ 5	10/ 5	5/ 00	5
151	474/ 2	2/ 5	9/ 0	3/ 75	6
175	354/ 7	4/ 5	10/ 5	5/ 00	7
147	409/ 5	3/ 5	12/ 0	2/ 50	8
164	355/ 7	4/ 5	12/ 0	3/ 75	9
174	358/ 5	3/ 5	12/ 0	5/ 00	10
156	418/ 3	4/ 5	9/ 0	3/ 75	11
158	405/ 6	3/ 5	10/ 5	3/ 75	12
158	405/ 6	3/ 5	10/ 5	3/ 75	13
158	405/ 6	3/ 5	10/ 5	3/ 75	14
157	410/ 3	2/ 5	12/ 0	3/ 75	15

پس از آنالیز داده‌های آزمایش‌ها توسط نرم‌افزار مینی‌تب مدل‌های ارائه شده برای تنش و وزن بررسی و براساس معیارهای اعتبارسنجی که در زیر به آن اشاره شده است، اعتبار مدل و نتایج بدست آمده تایید گردیده است.

✓ ضرایب همبستگی که در جدول ۱۲ نشان داده شده، دارای مقادیری نزدیک به یک است.

✓ مقدار P-Value مدل در آنالیز واریانس جداول ۱۳ و ۱۴ کمتر از ۰/۰۵ و برابر صفر است.



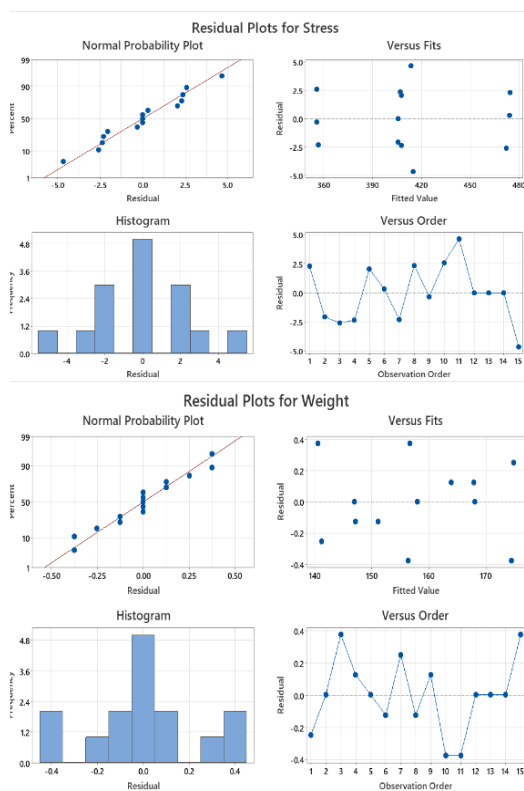
شکل ۱۶- نمودار پارتو فاکتورهای مؤثر وزن جعبه‌بال

همچنین دو اثر تعاملی علاوه بر اثرهای اصلی در وزن جعبه‌بال نیز اثرگذار هستند که در جدول ۱۵ ترتیب میزان اثر فاکتورها بیان گردیده است.

جدول ۱۵- فاکتورهای مؤثر در آزمایش‌های باکس بنکن

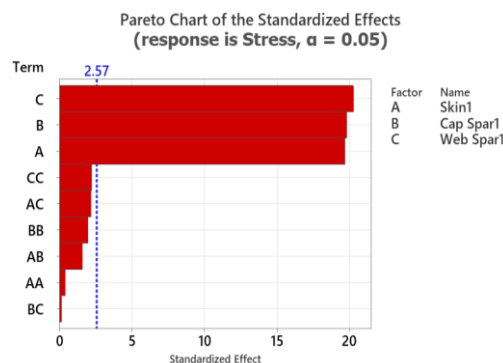
فاکتور	ترتیب اثر تنش	ترتیب اثر وزن
Skin1	۳	۱
Cap Spar1	۲	۲
Web Spar1	۱	۳
Skin1* Cap Spar1	-	-
Skin1* Web Spar1	-	-
Cap Spar1* Web Spar1	-	۵
Skin1* Skin1	-	-
Cap Spar1* Cap Spar1	-	۴
Web Spar1*Web Spar1	-	-

در این پژوهش با توجه هدف بهینه‌سازی که رسیدن به بیشترین تنش ون مایز مجاز با مقدار ۳۳/۳۳ مگاپاسگال و کمینه کردن وزن جعبه‌بال است، از گزینه هدف مشخص برای تنش و کمینه کردن وزن در نرم‌افزار مینی‌تب استفاده شده است. پس از بهینه‌سازی هم‌زمان فاکتورهای مؤثر بر تنش و وزن جعبه‌بال، به منظور بررسی صحت و دقت مدل در پیش‌بینی شرایط بهینه، تحلیل سازه بال با مقادیر بهینه انجام شده است که درصد اختلاف مقادیر به دست آمده برای تنش و وزن جعبه‌بال با مقادیر پیش‌بینی شده در جدول ۱۶ قابل مشاهده است.



شکل ۱۴- نمودارهای باقیمانده تنش و وزن

پس از تایید نتایج آنالیز آزمایش‌های طراحی شده، میزان اثر سه فاکتور بر تنش و وزن جعبه‌بال از طریق نمودارهای پارتو قابل مشاهده است. در این نمودارها فاکتورهایی که از خط مرجع عبور می‌کنند، از نظر آماری معنی‌دار یا اثرگذار هستند. همان‌طور که در شکل ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده است، به ترتیب فاکتورهای پوسته، کپ اسپار و وب اسپار ناحیه نزدیک به ریشه بال بیشترین اثر بر روی تنش و وزن جعبه‌بال را دارا است.



شکل ۱۵- نمودار پارتو فاکتورهای مؤثر تنش جعبه‌بال

جدول ۱۶- اختلاف پاسخ پیش بینی شده با تحلیل سازه

پاسخ	تنش	وزن
درصد اختلاف	۰/۶۴	۰/۰۸

اختلاف بسیار پایین، بیانگر قدرت تخمین و پیش‌بینی بالا این مدل برای یافتن نقاط بهینه است. مقادیر بهینه فاکتورهای مؤثر بر تنش و وزن جعبه‌بال، وزن و تنش جعبه‌بال بهینه‌شده و مقدار مطلوبیت ترکیب فاکتورها در جدول ۱۷ و شکل ۱۷ قابل مشاهده است. مطلوبیت ترکیب فاکتورها، ارزیابی می‌کند که ترکیبی از متغیرها چه مقدار اهدافی را که برای پاسخ‌ها تعریف شده است برآورده ساخته است. مقدار مطلوبیت در محدوده صفر تا یک قرار دارد که مقدار یک حالت ایده‌آل آن است. همان‌طور که در شکل ۱۷ نیز قابل مشاهده است، با کاهش ضخامت فاکتورهای ناحیه نزدیک ریشه بال تنش کاهش و وزن بیشتر می‌شود و از آنجا که شیب نمودار پوسته تندتر است مقدار کاهش تنش و افزایش وزن بیشتر است.

ضخامت بهینه اجزای جعبه‌بال و تنش و وزن مربوط به آن، با توجه به قرار گرفتن فاکتورهای غیر مؤثر در کمترین مقدار خود و بهینه‌سازی فاکتورهای مؤثر در جدول ۱۸ بیان شده است. همان‌طور که در این جدول نشان داده شده است، وب اسپار ناحیه نزدیک به ریشه بال بیشترین ضخامت و ریب ناحیه نوک بال از کمترین ضخامت برخوردار است؛ همچنین نحوه توزیع جرم در اجزای جعبه‌بال بعد از بهینه‌سازی در جدول ۱۹ نشان داده شده است.

جدول ۱۸- ابعاد بهینه جعبه بال

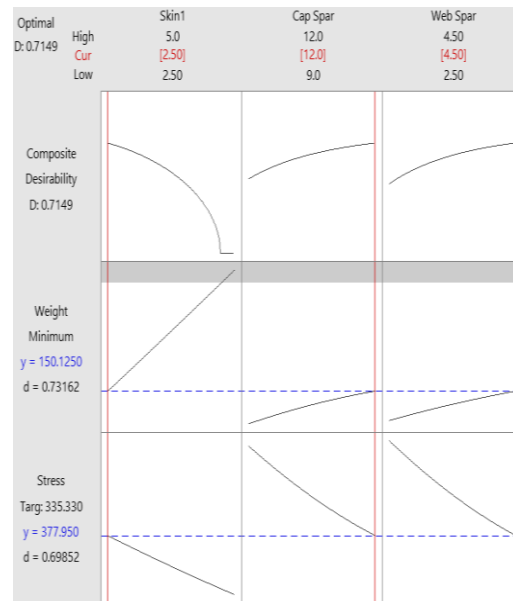
فاکتور	ضخامت(میلی متر)	تنش	وزن
Rib1	۱/۵	۲۸۰/۴ مگاپاسکال	۱۵۰ کیلوگرم
Rib2	۱/۲		
Rib3	۱		
Skin1	۲/۵		
Skin2	۲		
Skin3	۱/۵		
Cap Spar1	۱۲		
Cap Spar2	۸		
Cap Spar3	۷		
Web Spar1	۴/۵		
Web Spar2	۲		
Web Spar3	۱/۵		

جدول ۱۹- درصد جرمی اجزای جعبه‌بال بهینه شده

جعبه‌بال	جرم	درصد جرمی
جرم کل	۱۴۹/۹۸	۱۰۰
پوسته	۶۴/۴	۴۲/۹۴
ریب‌ها	۶/۹۸	۴/۶۶

اسپار	کپ	وب	کل
جلو	۲۷	۱۳/۵	۹
	۲۷	۴۰/۵	۲۷
عقب	۲۷	۱۱/۱	۷/۴۰
	۲۷	۳۸/۱	۲۵/۴
کل	۷۸/۶		۵۲/۴

پوسته بیشترین جرم و درصد جرمی و ریب‌ها کمترین جرم و درصد جرمی برای جعبه‌بال را دارا هستند. از این مطلب به اهمیت زیاد بهینه‌سازی ضخامت پوسته‌ها در کاهش وزن سازه



شکل ۱۷- مقادیر بهینه فاکتورها مؤثر بر تنش و وزن

جدول ۱۷- مقادیر بهینه فاکتورها مؤثر بر تنش و وزن

Solution	Skin1	Cap Spar1	Web Spar1
۱	۲/۵	۱۲	۴/۵
Composite Desirability	Weight Fit	Stress Fit	Composite Desirability
۰/۷۱۴۸۷۸	۱۵۰/۱۲۵	۳۷۷/۹۵	۰/۷۱۴۸۷۸

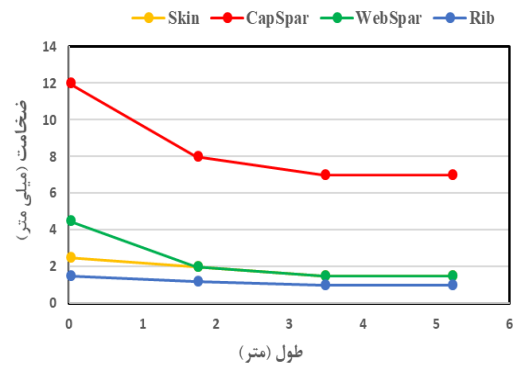
۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک سازه بال با مشخصات هندسی و بارگذاری مشخص مدل‌سازی شده و سپس با استفاده از نرم‌افزار آباکوس مورد تحلیل استاتیکی قرار گرفته است. در نهایت از طریق روش طراحی آزمایش‌ها ضخامت اجزای ناحیه جعبه‌بال در راستای طول بال بهینه‌سازی گردیده است. نتایج این پژوهش حاکی از آن است که ناحیه جعبه‌بال در سازه بال پس از بهینه‌سازی شاهد کاهش وزن ۴۶/۶۱ درصدی است؛ همچنین بیشترین درصد کاهش وزن اجزای جعبه‌بال مربوط به پوسته و در رتبه بعدی ریب‌ها است. باید توجه داشت که جهت بررسی بهینه‌سازی کامل‌تر سازه از پاسخ‌های دیگری همچون بارخستگی و بارکمانشی نیز باید استفاده نمود، ولی در این پژوهش سعی شده است با به کارگیری تحلیل استاتیکی شیوه‌ای جدید در بهینه‌سازی سازه بال معرفی گردد.

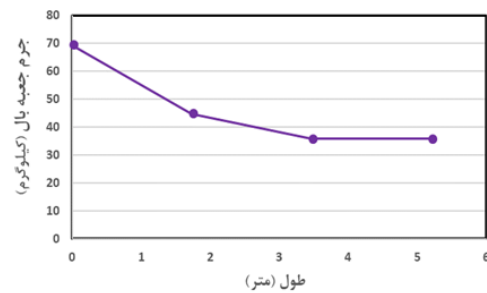
مراجع

- [1] Grihon S, Mahe M (1999) Structhreal and multidisciplinary optimization applied to Aircraft desine. WCSMO-3. Buffalo, NY, USA.
- [2] Balabanov V, Garcelon JH (1999) Integrating visuaidoc and genesis for multidisciplinary optimization of a transport aircraft wing. WCSMO-3. Buffalo, NY, USA.
- [3] Krog L, Tucker A, Kemp M, Boyd R (2004) Stress analysis and weight optimization of a wing box structure subjected to flight loads. IJES, 3: .33-40.
- [4] Guo S, Morishima R, Zhang X, Mills A (2009) Cutout shape and reinforcement design for composite C-section beams under shear load. Composite Structures, 88: 179-187.
- [5] Ainswort J (2010) Airframe wingbox preliminary design and weight prediction. Collier Research Corporation, Published By The Society Of Allied Weight Engineers (SAWE) With Permission.
- [6] Immanuel D, Arulselvan K, Maniirasan P, Senthilkumar S (2014) Stress analysis and weight optimization of a wing box structure subjected to flight loads. IJES, 3:33-40.
- [7] Ferroni Soares L (2015) Structural analysis of a wing box. IRJET, 5,:23-31.
- [8] Pujari C, Patil SF (2016) Stress, fatigue analysis and weight optimization of wing box with splice joint of a transport aircraft. IJERA, 3(6).

بال و جعبه‌بال می‌توان پی برد. نمودار تغییرات ضخامت اجزای جعبه‌بال در امتداد طول بال در شکل ۱۸ نشان داده شده است؛ همچنین نمودار تغییرات جرم جعبه‌بال در امتداد طول بال نیز در شکل ۱۹ نمایش داده شده است.

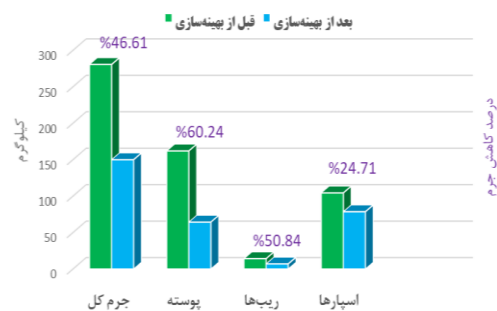


شکل ۱۸- نمودار تغییرات ضخامت اجزای جعبه‌بال



شکل ۱۹- نمودار تغییرات جرم جعبه‌بال

در شکل ۲۰ نمودار مقایسه‌ای جرم کل و جرم اجزای جعبه‌بال قبل و بعد از بهینه‌سازی نمایش داده شده است.



شکل ۲۰- نمودار مقایسه جرم کل و جرم اجزای جعبه‌بال قبل و بعد از بهینه‌سازی

- [۹] سیف م (۱۳۸۴)، آنالیز، طراحی و بهینه‌سازی ابعادی اجزای بال هواپیما، پایان نامه مقطع کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک (طراحی کاربردی)، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس.
- [۱۰] بهشت‌آیین ح (۱۳۹۲)، مدل‌سازی و تحلیل سازه‌ای بال هواپیمای تجاری، پایان نامه مقطع کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک (طراحی کاربردی)، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز.
- [۱۱] ضامنی ا، فاضل زاده حقیقی ا (۱۳۹۳)، مدل‌سازی و تحلیل قابلیت اعتماد سازه بال هواپیما، پایان نامه مقطع کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک (طراحی کاربردی)، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز.
- [۱۲] سعادت‌تی س، شهرآبادی م (۱۳۹۵)، طراحی و تحلیل بال آلومینیومی هواپیما و بهینه‌سازی آن با استفاده از کامپوزیت‌ها، دومین همایش یافته‌های نوین در هوافضا، مکانیک و علوم وابسته، دانشگاه تهران.
- [۱۳] اسماعیلیان م (۱۳۹۹)، تحلیل تجربی شکل‌دهی افزایشی ورقه‌ی چندلایه فلز-پلیمر، پایان نامه مقطع دکترای مهندسی مکانیک (ساخت و تولید)، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند.
- [۱۴] خوشدست ح (۱۳۹۸)، طراحی و تحلیل آزمایش‌ها با رویکرد کاربردی، گروه فرآوری مواد معدنی، بخش مهندسی معدن، مجتمع آموزش عالی زرنند.