



# Analysis of composite double-curved sandwich panel joints of meteorological radar radome under compression load

Alireza Abidi<sup>1</sup> , Majid Mokhtari<sup>\*2</sup> , Seyyed Mahdi Hosseini Farrash<sup>3</sup> 

<sup>1</sup>MS Graduated, Faculty of Mechanical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

<sup>2</sup>Assistant professor, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

<sup>3</sup>Assistant professor, Faculty of Mechanical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

## ARTICLE INFO

### Article Type:

Original Research

**Received:** 17.02.2025

**Revised:** 19.05.2025

**Accepted:** 27.10.2025

### Keyword:

Radome  
Mechanical joints  
Sandwich panel  
Buckling  
Composites

### Corresponding Author:

Majid Mokhtari

**Email:** [M\\_Mokhtari@tvu.ac.ir](mailto:M_Mokhtari@tvu.ac.ir)

## ABSTRACT

Joints are one of the most important components of engineering structures. Bolted connections are a common type of connection used in sandwich and laminate structures. As with other joint designs, these connections should be designed so that damage does not occur at the connection area. Joints used in telecommunications structures should be non-metallic or contain the least amount of metal possible so as not to obstruct the passage of waves or cause unwanted radiation. Sandwich composites are used for telecommunications covers (radomes), which must be transparent to electromagnetic waves. The double-curved sandwich components that form the radome dome are connected at connection points as an integrated laminate with bolts. This paper presents the results of an experimental and numerical study of the compressive strength and buckling evaluation of double-curved sandwich panels connected with bolts. The results are used to evaluate the joints' strength against in-plane compressive loads caused by wind.



---

## EXTENDED ABSTRACT

---

### Introduction

Joints are one of the most important parts of engineering structures. Mechanical joints are used for sandwich and laminate structures. Like the design of other joints, the design of these connections must be such that damage does not occur in the connection area. Joints used in telecommunication structures should be non-metallic as much as possible or with the lowest amount of metallic materials so as not to be an obstacle to the passage of waves or the occurrence of unwanted back-radiation. Sandwich composites are used for telecommunications covers (radomes) that must be transparent to electromagnetic waves. The double-curved sandwich segments that make up the radome dome are connected at the connection points as a single laminate and with metallic bolts. Telecommunication radomes are an important part of telecommunication systems that are responsible for protecting the system from environmental conditions. The structure of the radome must be such that it meets the main requirements both in terms of telecommunication and mechanical. Hence, its design is accompanied by challenges.

### Methodology

In this paper, the analysis process has been carried out experimentally and numerically. ABAQU has been used in the software analysis. The method of manufacturing and producing compression specimens is explained below. Considering the importance of joints in sandwich structures of telecommunication radome, by manufacturing a sample of these joints, the influence of the construction process and geometric shape on the compressive strength of the structure has been investigated.

In order to find the critical buckling load, the samples were tested by a Zwick compression testing machine with a force capacity of 500 kN. The samples were clamped in the machine with a length of 41 cm in both ends. The samples were placed 5 cm inside the jaws on each side to fully satisfy the engagement conditions.



**Figure 1. Schematic of joint mould to manufacturing a sandwich panel joint**

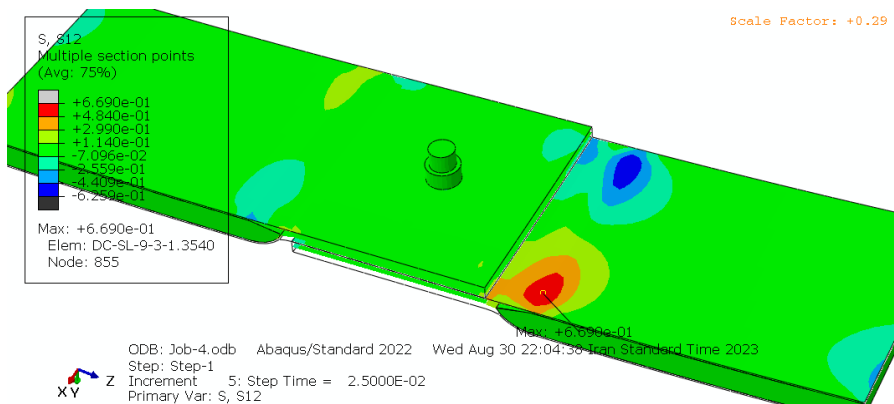
Joints used in telecommunication structures should be non-metallic as much as possible or with the lowest number of metallic materials so as not to be an obstacle to the passage of waves or the occurrence of unwanted back-radiation. Sandwich composites are used for telecommunications covers (radomes) that must be transparent to electromagnetic waves. The double-curved sandwich segments that make up the radome dome are connected at the connection points as a single laminate and with metallic bolts. In this article, the compressive strength and buckling evaluation of double-curved sandwich panels jointed with bolt have been investigated, numerically and experimentally. The obtained results are used to evaluate the strength of the joints against in-plane compressive loads caused by wind load.

## Results and discussion

According to the extracted experimental results, the critical buckling load is reported at 1300 newtons. The damage process of the sample from the beginning of the loading period to the end.

In order to use numerical analysis to accurately evaluate the connection, a boundary element model of the connection was built and analyzed in ABAQUS software. The boundary conditions and loading were modeled according to the tested condition in the machine jaw and edge loading was used for loading. The sandwich panel model is three-dimensional and the properties of the different foam sections, surfaces and metal parts were defined by defining the cross-section in the structure. The mesh dimensions were determined after the mesh analysis process and a larger number of elements were used in critical areas such as bolts.

At the moment when the highest critical buckling load was reported in the experimental analysis, the amount of shear stress distributed in the connection is reported in Figure 2. The maximum stress reported is 660 kPa, which is higher than the shear strength of foam (560 MPa). This indicates that the estimation of failure will start from this area.



**Figure 2. The highest shear stress in the foam-core connection area equals 669 MPa**



**Figure 3. Experimental process of edge-wised compression test and failure modes**

Numerical results are compared with experimental results. Experimental tests are performed according to the test set up of figure 3.

At the moment when the maximum critical buckling load was reported in the experimental analysis, the amount of shear stresses distributed in the connection was reported. The maximum stress reported is 660 kPa, which is higher than the shear strength of the foam (560 MPa). This indicates that the failure initiation is estimated to be from this area. The results obtained are in very good agreement with the reported experimental results.

### **Conclusion**

Compressive loading is one of the common loads on the sandwich structures of telecommunications radomes. By experimentally and numerically evaluating the durability of this structure with respect to compressive loads, the allowable design values were reached.

Comparison of the maximum critical buckling load in the test and experimental results has brought good results. The double curvature of the structure has added to its complexity. The proposed construction method and materials can be used in operational structures.

### **Acknowledgment**

Hereby, I am grateful for the efforts of Dr. Hosseini Farrash who helped me in completing this project.



## تحلیل اتصالات ساندویچ پنل کامپوزیتی دو انحنایی رادوم رادار هواشناسی تحت بار فشاری

علیرضا عبیدی<sup>۱</sup>، مجید مختاری<sup>۲\*</sup>، مهدی حسینی فراش<sup>۳</sup>

- ۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.
- ۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران.
- ۳- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

### چکیده

### اطلاعات مقاله

اتصالات از مهم‌ترین بخش‌های سازه‌های مهندسی هستند. اتصالات پیچی از اتصالات متداول برای سازه‌های ساندویچی و چندلایه هستند. به مانند طراحی دیگر اتصالات طراحی این اتصالات نیز باید به صورتی باشد که آسیب از ناحیه اتصال اتفاق نیفتد. اتصالاتی که در سازه‌های مخابراتی استفاده می‌شوند باید حتی الامکان غیر فلزی یا با کمترین مقدار مواد فلزی باشند تا مانعی در برابر عبور امواج یا بروز تشعشع ناخواسته نباشند. برای پوشش‌های مخابراتی (رادوم) که باید نسبت به امواج الکترومغناطیسی شفاف باشند از کامپوزیت‌های ساندویچی استفاده می‌شود. اجزای ساندویچی دوانحنایی که تشکیل دهنده گنبد رادوم هستند در نقاط اتصال به صورت یک لمینیت یکپارچه و با پیچ به هم متصل می‌شوند. در این مقاله به بررسی تجربی و عددی استحکام فشاری و ارزیابی کمانش ساندویچ پنل‌های دو انحنایی متصل شده با پیچ پرداخته شده است. نتایج بدست آمده برای ارزیابی میزان استحکام اتصال در برابر بارهای فشاری درون صفحه‌ای ناشی از وزش باد مورد استفاده قرار می‌گیرد.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۲۹

بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۲۹

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۸/۰۵

### کلید واژگان:

رادوم  
اتصال مکانیکی  
ساندویچ پنل  
کمانش  
کامپوزیت

نویسنده مسئول: مجید مختاری  
پست الکترونیکی:  
[m\\_mokhtari@tvu.ac.ir](mailto:m_mokhtari@tvu.ac.ir)



## مقدمه

اتصال توکار<sup>۱</sup> یکی از انواع اتصالات جدا شدنی است که اتصال پنل‌های ساندویچی و دیگر قطعات سازه‌های مانند قاب‌ها، پروفیل‌ها، بست‌ها و همچنین نصب و استقرار تجهیزاتی مانند جعبه‌ها، خطوط تدارکاتی و داکت‌ها را فراهم می‌سازد. پوشش‌های مخابراتی (رادوم<sup>۲</sup>) علاوه بر مشخصات مکانیکی باید در برابر امواج الکترومغناطیسی شفاف باشند. اتصالات مکانیکی مورد استفاده برای اتصال بخش‌های مختلف رادوم به عنوان مهم‌ترین بخش از سازه‌های رادوم هستند. اهمیت این بخش هم از نظر مخابراتی و از بابت استفاده از پیچ‌های فلزی و ساختارهای ضخیم لمینیتی است و هم از نظر استحکام مکانیکی اتصال. موضوع اتصالات و ساختارهای کامپوزیتی تحت فشار به عنوان موضوع مورد علاقه‌ای در ادوار مختلف بوده است.

وانگ و همکاران [۱] در سال ۲۰۰۵، شکست فشاری و کماتش لمینت‌های کامپوزیت حاوی لایه چینه‌های مختلف را مورد بررسی قرار دادند. آزمایش فشرده سازی نمونه‌های پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه‌ای شامل لایه‌لایه شدن‌های تعبیه شده‌ی تک و چندگانه انجام شد و از مدل سازی المان محدود برای درک بیشتر مکانیزم‌های شکست تحت فشار استفاده شد.

اصلان و همکارش [۲] در سال ۲۰۰۸ رفتار کماتشی و شکست فشاری لمینت‌های کامپوزیتی حاوی چند عیب لایه‌لایه شدن بزرگ را مورد بررسی قرار دادند. اثرات اندازه عیب‌ها بر بار کماتش بحرانی و بار شکست فشاری در کامپوزیت لایه‌های E-Glas/epoxy با چندین نقص بزرگ، در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج استخراج شده نشان داد که عیوب ترکیبی، بار کماتش و بار شکست فشاری لمینت‌ها را کاهش می‌دهند. و همچنین ضخامت لایه‌های زیرین تأثیر قابل توجهی بر بار کماتش و بار شکست فشاری لایه‌های کامپوزیت ندارد.

تروگسل و همکارانش [۳] در سال ۲۰۰۹ به بررسی ساندویچ پنل کامپوزیتی منحنی دوانحنایی الیاف شیشه و مقایسه هسته فوم و لانه زنبوری تحت بار عرضی و مکانیکی برای سازه‌های هیبریدی کامپوزیتی مورد استفاده در کشتی پرداختند. یکی از عیوب موجود آمده برای سازه‌های تحت بار عرضی فشاری، کماتش موضعی است که در این مقاله بررسی شده است. پانل‌های ساندویچی خمیده به صورت عددی و تجربی مورد مطالعه قرار گرفتند و تحت فشار هیدرواستاتیک آب آزمایش شدند.

گائو و هوفات [۴] در سال ۲۰۱۳، کماتش صفحه‌ای موضعی در یک پانل ساندویچی منحنی کامپوزیتی تحت بار فشاری پالسی را به صورت تحلیلی بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که پوسته‌های نازک و با شعاع انحنای زیاد عمدتاً کماتش موضعی را تجربه می‌کنند و رخداد شکست رویه‌ها در مرتبه دوم مود آسیب گزارش شده است. آن‌ها گزارش کردند که طراحی چیدمان لایه‌ای می‌تواند روی به تأخیر انداختن کماتش موضعی رویه‌ها در پنل‌های دارای انحناء، تأثیر مثبت داشته باشد. در این مقاله نیز به بررسی تأثیر دو انحنایی بودن پنل پرداخته نشده است و تأثیر لایه‌های کامپوزیتی بر کماتش به صورت تحلیلی ارزیابی شده است. همچنین بارگذاری مورد بررسی بار فشاری لحظه‌ای است.

از دیگر پارامترهای تأثیرگذار بر رفتار مکانیکی ساندویچ پنل‌های تحت بار فشاری، اثر شرایط دمایی و نوع هسته است. موضوع بررسی شرایط دمایی، بارگذاری فشاری و ارزیابی کماتش اجزای هسته، برای ساندویچ پنل‌های با هسته‌های هرمی توسط لیو و همکاران [۵] در سال ۲۰۱۵ انجام شد. آنها پاسخ‌های فشاری خرابی هرمی کامپوزیت الیاف شیشه ساندویچ پانل هسته‌ای در دماهای مختلف مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش ساندویچ پانل کامپوزیت الیاف شیشه با هسته‌های خرابی هرمی توسعه یافته بر اساس فناوری قالب گیری انتقال رزین به کمک خلا ساخته

<sup>۱</sup> Insert<sup>۲</sup> Radome

شد. آزمایش‌های فشار خارجی روی پانل‌های ساندویچ کامپوزیتی در محدوده دمایی ۶۰- تا ۱۲۵ درجه سانتی‌گراد انجام شد. سپس اثرات دما بر مقاومت فشاری، مدول فشاری و مکانیزم شکست مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. نتایج آن‌ها نشان داد که رژیم سرد دمایی منجر به افزایش مدول فشاری و استحکام می‌شود، در حالی که دمای بالا باعث کاهش مدول فشاری و استحکام می‌شود.

از دیگر مقالاتی که به بررسی تاثیر نوع هسته بر رفتار فشاری پنل پرداخته است پژوهش ده‌آبادی و همکاران [۶] است. رفتار ساختارهای ساندویچی با پوسته‌های کامپوزیتی و هسته متشکل از فوم و یک لایه کامپوزیت موج دار تحت بار فشاری به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. سه شکل هندسی شامل اشکال مربعی، دوزنقه‌ای و مثلثی برای لمینیت کامپوزیت موج دار در نظر گرفته شده است و نتایج با نمونه مرجع با هسته ساده که از فوم ساخته شده مقایسه شده است. لایه کامپوزیت موج دار از شیشه بافته شده و رزین اپوکسی ساخته شده و برای هسته از فوم PVC استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از کامپوزیت چندلایه موجدار در هسته، خواص مکانیکی (مانند مقاومت فشاری، سختی محوری، چقرمگی) و نسبت خواص مکانیکی به وزن این سازه‌ها را در بهترین مقدار تا ۳۰٪ بهبود می‌بخشد. با بررسی شکل هسته‌های مختلف گزارش شد که بهترین خواص مکانیکی برای ساختار هسته‌ی مربع شکل است.

بررسی تحلیلی و عددی پنل‌های ساندویچی دو انحنایی بدون در نظر گرفتن ناحیه اتصال این آن‌ها موضوعی بوده است که خرم‌آبادی و همکارش [۷] در سال ۲۰۲۳ بررسی کردند. تاثیر استفاده از سیم آلیاژ حافظه دار در خواص فشاری و ارزیابی بار کمانش از مواردی بوده است که در این پژوهش به آن پرداخته شده است.

حل تحلیلی مسائل مربوط به ساندویچ پنل‌های دو انحنایی از موضوعاتی است که مورد علاقه پژوهشگران بوده است. زکرنیس [۸] در سال ۲۰۲۱ با تحلیل یک ساندویچ دوانحنایی که از یک هسته انعطاف پذیر برخوردار است به تحلیل رفتار برشی و نورمال آن پرداخته است. در این پژوهش از معادلات برشی مرتبه اول، مرتبه دوم و مرتبه سوم برای ارزیابی لایه لایه شدگی رویه‌ها استفاده شده است. موضوع شکل هندسی پیچیده در این مقاله بررسی نشده است.

کارتیکیان و همکاران [۹] در سال ۲۰۲۰ سفتی و استحکام کمانش پنل‌های مختلف ساخته شده برای یک بال را به صورت تجربی و تحلیلی را مورد بررسی قرار دادند. کمانش در سازه‌های هواپیما نامطلوب است زیرا مسیر بار و در نتیجه رفتار سازه را تغییر می‌دهد.

عسجدی و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۲۱ رفتار کمانشی و ارتعاشی ستون‌ها و تیرهای کامپوزیتی با ساختار ساندویچی دارای رویه الیاف شیشه/اپوکسی و هسته فومی را به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش تاثیر تغییر هسته بر بار بحرانی کمانش و همچنین تاثیر افزودن نانوس با درصد‌های ۳، ۵ و ۷ درصد بر بار بحرانی کمانشی تیر ساندویچ پنل انجام گردید. مشاهده شد که با تغییر هسته از هسته ساده به زیگزاگی بدون افزودن نانوذره، نیروی بحرانی کمانش ۲۲ درصد کاهش پیدا کرده است. با افزایش نانوذرات در نمونه ۷ درصد وزنی، بیشترین افزایش (حدود ۳۲٪) در بار بحرانی کمانش بدست آمده است.

مختاری و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۹ طراحی و اندازه‌گیری اولین نمونه پنل رادوم ساندویچی باند C ایران برای رادار هواشناسی را به صورت تجربی انجام دادند. آن‌ها طراحی مهندسی و آزمون‌های تجربی روی اولین نمونه از رادوم ساندویچی برای رادار هواشناسی باند C به همراه آزمون‌های الکترومغناطیسی و آزمون کمانش مربوط به پنل‌ها را انجام دادند. همچنین ارزیابی پایداری مکانیکی با شبیه‌سازی المان محدود در نرم افزار آباکوس ۱۲/۶ و آزمون کمانش و ارزیابی بهره‌وری الکترومغناطیسی با آزمون الکترومغناطیسی ارزیابی شده است. نتایج آزمون کمانش برای ساندویچ تخت ساخته شده، نشان می‌دهد که این سازه می‌تواند تا بار کمانش ۱۹۰ نیوتن را به طور ایمن تحمل کند. مطابق آزمون‌های الکترومغناطیسی الزامات مربوط به محدودیت‌های افت عبوری یک طرفه و اختلاف دو قطبش با

احراز مقادیر در محدوده، اجابت شده است و مشخص شد که نمونه‌ی طراحی و ساخته شده قابلیت استفاده برای نمونه‌های اولیه را دارد.

با بررسی پیشینه تحقیق مشخص می‌شود که بررسی بارگذاری فشاری و ارزیابی تغییرات هسته ساندویچ پنل با فراوانی زیادی در پژوهش‌های پیشین پرداخته شده است. تحلیل عددی و حل تحلیلی سازه‌های دو انحنایی نیز به عنوان موضوعی بوده است که با فراوانی کمتر مورد بررسی محققان قرار گرفته است. این در حالی است که بررسی اتصالات سازه‌های ساندویچی دو انحنایی با هندسه خاص در نظر گرفته شده در این مقاله، تا کنون مورد بررسی و تحقیق قرار نگرفته است. از این رو با توجه به اهمیت این سازه‌ها در پوشش‌دهی آنتن‌های مخابراتی رادار هواشناسی و رادارهای نظامی (به عنوان مثال‌های کاربردی) اهمیت تحلیل این سازه‌ها را بیش از پیش روشن می‌کند. با توجه به کاربرد گسترده ساندویچ پنل‌های دو انحنایی در رادوم‌های رادارهای مخابراتی، شناسایی رفتار این سازه‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. بر اساس پیشینه گزارش شده در این مقاله و تجربیات تیم که در مرجع [۱۲] به تفصیل اشاره شده است، بررسی تجربی اتصالات به کار رفته در ساندویچ پنل‌های دو انحنایی به عنوان پژوهشی است که با این هندسه در تحقیق‌های بررسی شده، گزارش نشده است. در این مقاله به بررسی تجربی و عددی بارگذاری فشار لبه‌ای در ساندویچ پنل‌های دو انحنایی بسته شده با اتصالات پیچی پرداخته شده است. برای بررسی مود آسیب اتفاق افتاده و تفسیر رفتار اتصال تحت بار فشاری از تحلیل‌های عددی و از نرم افزار المان محدود ABAQUS استفاده شده است.

## نتایج تجربی

برای بررسی رفتار مکانیکی ساندویچ پنل‌های دو انحنایی در بارگذاری فشاری، نمونه‌های تستی با رزین اپوکسی ۸۲۸ و الیاف شیشه ساخته شد. برای ساخت هر جزو اتصال از قالب‌های چوبی ماشینکاری شده استفاده شد. ابعاد نمونه‌ها برای تحلیل‌های عددی و تجربی بر اساس ابعاد استفاده شده در نمونه واقعی برداشته شده است. با بررسی مطالعات پیشین و تحقیق در مورد خواص الیاف و رزین و همچنین کاربری مشخص شده برای قطعه، نتیجه شد که الیاف شیشه بافته شده ۴۰۰ و ۲۰۰ گرمی و رزین اپوکسی هواپخت ۱ با کد تجاری EPL1012 و سخت‌کننده ۲ EPH112 در ساخت سازه استفاده شود. نسبت هاردنر به رزین به صورت ۱/۱۲ می‌باشد. برای هسته از فوم پلی یورتان با چگالی ۸۰ گرم بر متر مکعب استفاده شده است.

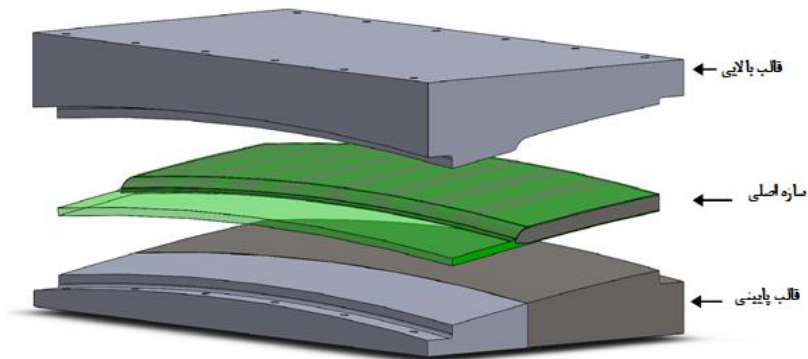
<sup>1</sup> Cold cure

<sup>2</sup> Hardener



شکل ۱. قالب ساندویچ پنل

ساخت سازه به روش قالب بسته (شکل ۱) و روش لایه چینی دستی و مواد به کاررفته در آن رزین اپوکسی به عنوان زمینه و پارچه شیشه بافته شده از نوع E به عنوان تقویت کننده می باشد. با توجه به سازه‌ی طراحی شده و انتخاب روش مناسب برای ساخت، قالب به صورت دو قسمتی طراحی شده است که یک قسمت، قالب پایین و قسمت دیگر قالب بالایی قطعه است (شکل ۲).



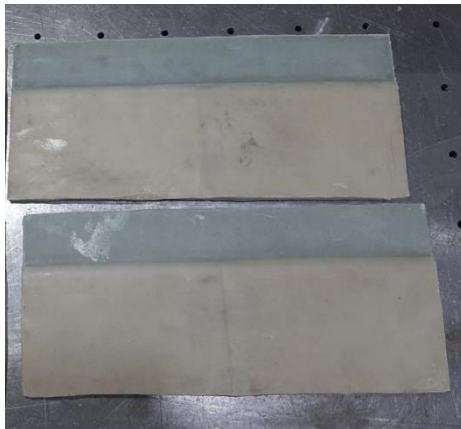
شکل ۲. شماتیک طراحی قالب رادوم ساندویچی دو انحنایی

با توجه به نمونه‌های موجود در صنعت و همچنین تجربیات کاری مشابه ترتیب لایه چینی به صورت ۳ [۹۰/۰] برای قسمت ساندویچی و برای قسمت لبه اتصال چندلایه‌ای چینی ۱۴ [۹۰/۰] انتخاب شد. همچنین ترتیب لایه چینی بر اساس وزن الیاف به کاررفته به صورت S [قوم/۲۰۰/۲۰۰/۲۰۰] برای قسمت ساندویچی و S [۴۰۰/۲۰۰/۴۰۰/۲۰۰/۴۰۰/۲۰۰] برای قسمت لبه اتصال چندلایه‌ای انتخاب شد. در آخر قالبها بر روی یکدیگر قرار گرفت و به وسیله پیچ و مهره بر روی یکدیگر بسته شدند (شکل ۳).



شکل ۳. قالب ساندویچی دو انحنایی در وضعیت بسته شده برای پخت

در شکل ۴ سازه‌های ساندویچی دو انحنایی ساخته شده نشان داده شده است که برش دادن پنل بزرگ به قطعات کوچکتر اجزای اتصال سازه ساندویچی ساخته شده است.



شکل ۴. سازه‌های ساندویچی دو انحنایی ساخته شده- اجزای اتصال

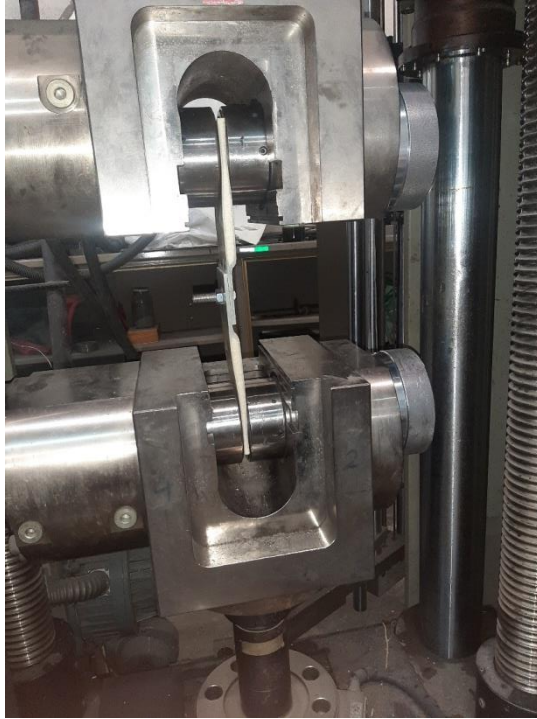
پس از ساخت سازه‌های ساندویچی، اجزای اتصال اندازه‌گیری و برش زده شد و به یکدیگر به وسیله پیچ و مهره M12 متصل شدند. ابعاد بخش‌های مختلف اتصال به شرح زیر است: قسمت ساندویچی ابعاد  $110 \times 240$  میلیمتر با ضخامت میانگین ۱۱ میلیمتر و قسمت لمینت (لبه اتصال) با ضخامت ۵/۵ میلیمتر می‌باشد (شکل ۵) همانطور که اشاره شد علت انتخاب این ابعاد الزامات مخابراتی و عملیاتی ای است که در اجرای اتصال و بر اساس نمونه مورد نیاز صنعتی دریاف شده است.



شکل ۵. سازه‌های ساندویچی دو انحنایی متصل شده با اتصال پیچی

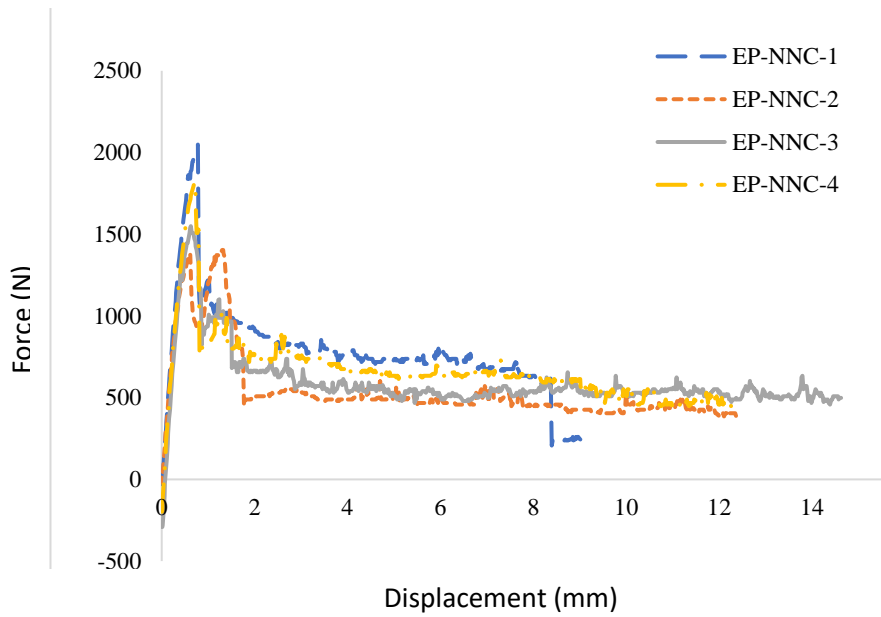
### روش انجام آزمایش

به جهت پیدا کردن بار بحرانی کمانش، نمونه‌ها توسط دستگاه تست فشار شرکت Zwick، دارای ظرفیت نیروی ۵۰۰ kN تست شدند. نمونه‌ها به طول ۴۱ cm در شرایط دو سر گیردار درون دستگاه بسته شدند. نمونه‌ها از هر طرف به میزان ۵ cm درون فک قرارداشتند تا شرایط درگیری به طور کامل اجابت شود (شکل ۶).

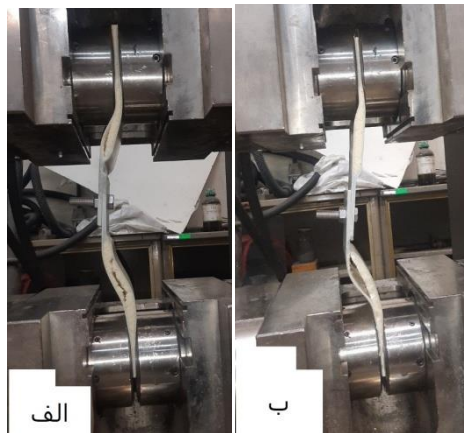


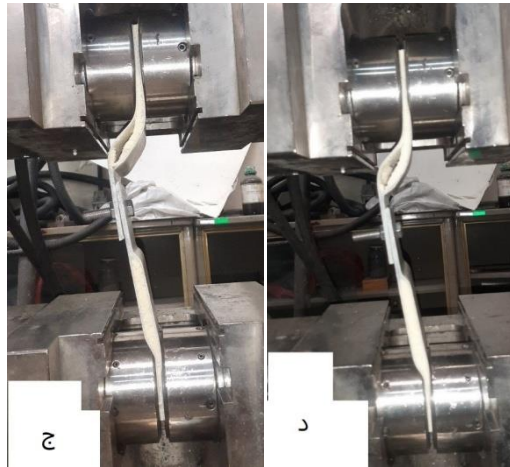
شکل ۶. دستگاه تست فشار و نمونه اتصال در حال تست

آزمون کماتش برای تمام سازه‌های ساندویچی متصل به هم، با تکرار چهار نمونه، انجام گردید. تصاویر نتایج و نمونه‌های سازه‌های متصل به یکدیگر در شکل ۷ و شکل ۸ ارائه شده است.



شکل ۷. نمودار نیرو - جابجایی سازه‌های ساندویچی دو انحنایی





شکل ۸. اثر بار فشاری بر سازه‌های ساندویچی: (الف) نمونه اول، (ب) نمونه دوم، (ج) نمونه سوم، (د) نمونه چهارم

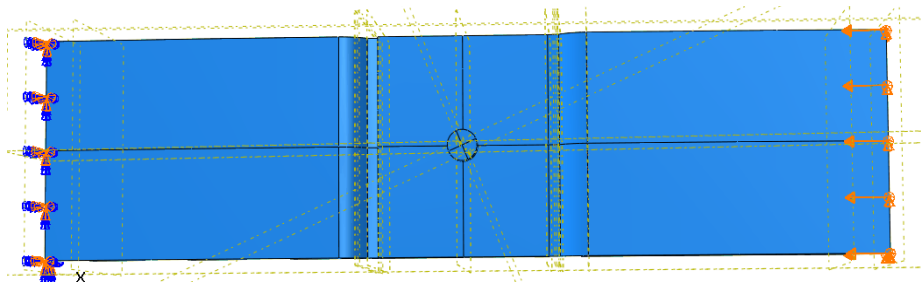
جدول ۱. بیشینه بار فشاری تحمل شده (N) و جابجایی تا آسیب (mm) برای اتصال های ساندویچی دو انحنایی

میانگین		نمونه ۴		نمونه ۳		نمونه ۲		نمونه ۱
Fmax	Disp.	Fmax	Disp.	Fmax	Disp.	Fmax	Disp.	Fmax
۱۷۰۵/۶	۱/۱۵	۱۸۲۰	۱/۰۲	۱۵۴۹/۶	۰/۸	۱۴۰۴	۱/۲	۲۰۴۸/۸

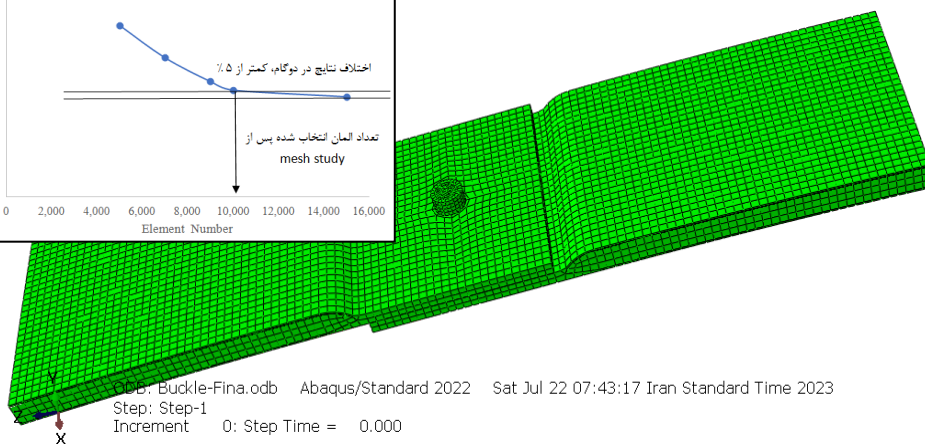
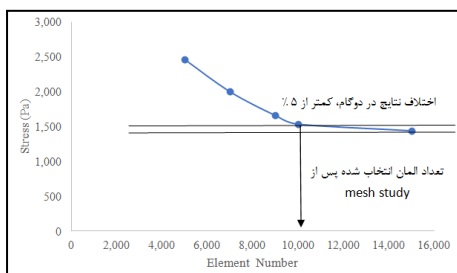
### تحلیل عددی

با توجه به ماهیت ترکیبی بودن موده‌های آسیب، اهمیت مودخرابی در اتصال و محدودیت تصویربرداری از اتصال، مدلسازی عددی برای تخمین خرابی‌های رخ داده شده در اتصال با نرم افزار ABAQUS انجام شد. مطابق شکل ۹، ابعاد نمونه‌ها، شرایط مرزی و بارگذاری مطابق وضعیت تست شده در فک دستگاه مدل شده است و برای بارگذاری از بارگذاری لبه ای استفاده شده است. مدل ساندویچ پنتل به صورت سه بعدی است و خواص بخش‌های مختلف فومی، رویه ها و قطعات فلزی با تعریف SECTION در سازه انجام شده است. به علت انحنادار بودن سازه، اتصال طراحی شده، بارهای ترکیبی فشاری و خمشی را به طور همزمان تجربه می‌کند. از آنجایی که استفاده از step کماتش در نرم افزار تنها به بررسی بارفشاری و نه مود بارگذاری ترکیبی می‌پردازد، لذا با تعریف یک Step از نوع Dynamic explicit به ارزیابی اثر بارگذاری متغیر با زمان پرداخته شد تا تاثیر بار فشاری و خمشی همزمان بررسی شود. در step تعریف شده نرخ بارگذاری مطابق روند تجربی به میزان ۵ میلیمتر در دقیقه انتخاب شد. ابعاد شبکه بعد از فرآیند

تحلیل شبکه ۱ تعیین شد و در نواحی بحرانی مانند پیچ از تعداد المان بیشتری بهره گرفته شد. کیفیت المان‌ها بعد از تحلیل سائز شبکه در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

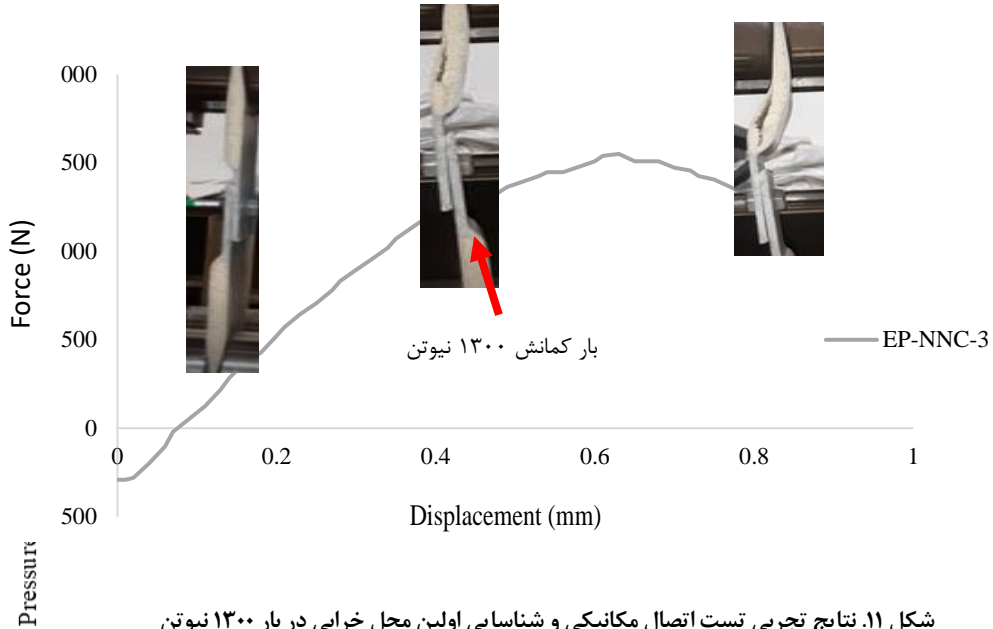


شکل ۹. شماتیک اعمال شرایط مرزی (بارگذاری فشاری گسترده از یک سمت و درگیر مدل شدن سمت دیگر اتصال)



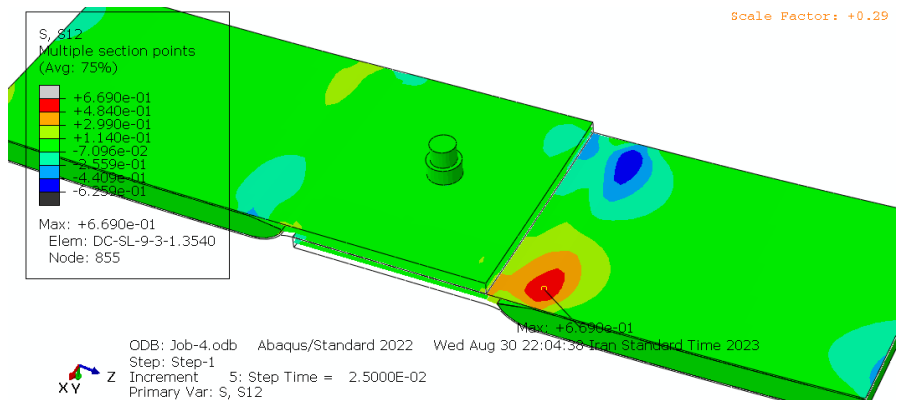
شکل ۱۰. شمایی از اتصال ساندویچی دو انحنایی و شبکه بندی انجام شده برای تحلیل عددی به همراه بررسی اسقلال پاسخ از اندازه شبکه (بر مبنای تنش نورمال در پیچ)

مطابق نتایج تجربی استخراج شده، بار بحرانی کمانش در ۱۳۰۰ نیوتن گزارش شده است (شکل ۱۱). روند آسیب نمونه از ابتدای دوره بارگذاری تا انتها در تصویر شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۱. نتایج تجربی تست اتصال مکانیکی و شناسایی اولین محل خرابی در بار ۱۳۰۰ نیوتن

در لحظه‌ای که بیشترین بار بحرانی کمانش در تحلیل تجربی گزارش شد، مقدار تنش‌های برشی توزیع شده در اتصال به صورت شکل ۱۲ گزارش شده است. همچنین در این شکل دیده می‌شود که به علت متفاوت بودن هندسه و بارگذاری، رفتار تنشی در اتصال نیز به صورت متقارن است و این رفتار مطابق انتظارات طراحی است. بیشینه تنش گزارش شده در تحلیل عددی که سطح آسیب قابل قبولی را ایجاد کرده است ۶۶۰ کیلو پاسکال است که در مقایسه با مقدار استحکام برشی فوم (۵۶۰ کیلو پاسکال) مقدار بیشتری است. همین امر نشان دهنده آن است که تخمین شروع خرابی از این ناحیه خواهد بود. نتایج بدست آمده با نتایج تجربی گزارش شده در شکل ۱۳ همخوانی قابل قبولی دارد.



شکل ۱۲. بیشترین تنش برشی در ناحیه اتصال فوم به هسته برابر با ۶۶۹ کیلو پاسکال



شکل ۱۳. نمایش آسیب دیدگی نمونه سوم در حین انجام تست فشار

با بررسی تحلیل عددی انجام شده طی اعمال فشار، اولین آسیب به صورت جدایش پوسته از هسته، در بار ۱۳۰۹ نیوتن و در محل رخ داد کمانش موضعی تست تجربی پیش بینی شده است. مقایسه بار بحرانی و محل رخ داد کمانش موضعی در نمونه‌های تجربی و عددی انطباق خوبی را بین نتایج عددی و تجربی نشان می‌دهد و نتایج عددی را تأیید می‌کند. نتایج بدست آمده از تحلیل عددی و مقایسه با نتایج تجربی در جدول ۲ گزارش شده است.

جدول ۲. مقایسه نتایج عددی و تجربی بدست آمده

بیشینه بار فشاری تا اولین آسیب	جابجایی تا اولین آسیب	مود آسیب شناسایی شده	محل آسیب	تنش برشی اتصال فوم به رویه	بیشینه تنش برشی اتصال فوم به رویه
N	mm	-		kPa	kPa
۱۳۰۰	۰/۴	به علت هم‌زمانی غیر قابل شناسایی	محل اتصال ساندویچ پنل به لمینیت	-	-
نتایج تجربی					

نتایج عددی	۱۳۰۹	۰/۳۷	جدایش رویه از هسته	محل اتصال ساندویچ پنل به لمینیت	۶۶۹	۵۵۰
اختلاف (مبنای محاسبه تجربی)	>۱٪	۹٪	-	-	-	-

### نتایج و جمع‌بندی

در این پژوهش به ارزیابی میزان استحکام فشاری اتصال دو انحنایی ساندویچی پرداخته شد. مقایسه نتایج عددی و تجربی جهت شناسایی مود خرابی اصلی انجام شد.

مقایسه ۴ تست تجربی صورت گرفته در جدول ۱ و مقایسه بیشینه بار تحمل شده و همچنین جابجایی متناظر با آن نشان داد که به طور متوسط این اتصال ۱۷۰۵/۶ نیوتن را می‌تواند تحمل کند و برای تحمل این مقدار ۱/۰۴ میلی‌متر جابجا خواهد شد. مقادیر بدست آمده در حالی است که مود خرابی اصلی از طریق تحلیل نتایج عددی و تفسیر آن با مقایسه تنش‌های نورمال و برشی در ناحیه اتصال انجام شده است. معیار بیشینه تنش مجاز برای ارزیابی خرابی لحاظ شد و با این تفا سیر اولین مود خرابی، از نوع برشی و در ناحیه بین رویه و هسته در محل پای اتصال تخمین زده شد.

بیشینه بارگذاری فشاری قابل تحمل روی اتصال بر اساس نتایج تجربی و بر مبنای رخدادهای اولیه آسب ۱۳۰۹ نیوتن تخمین زده شده است. با توجه به پیچیده بودن هندسه اتصال از نظر هندسه (دوانحنایی بودن) و پیچیدگی ساختاری (اتصال لمینیت به ساندویچ پنل) مودهای خرابی لایه لایه شدگی در ناحیه اتصال، جداسازی هسته از رویه در بخش اتصال بین ساندویچ و لمینیت، چروک رویه، لایه لایه شدگی در رویه و شکستگی هسته به عنوان آسیب‌هایی هستند که در فرآیند تست به صورت آسب پیش‌رونده محتمل هستند. روند تغییرات نیرو - جابجایی در تست فشار بدین صورت قابل بحث است که ابتدا سازه با تحمل بار فشاری و پذیرش تغییر شکل انرژی وارد شده را جذب می‌کند، کنار هم گذاشتن نتایج عددی و تجربی نشان می‌دهد که اولین آسیب از ناحیه اتصال رویه به هسته در محل تبدیل شدن سازه ساندویچی به ساختار لمینیت چندلایه است. طبق مشاهدات صورت گرفته و بر اساس روند افزایش نیروی رخ داده شده در نمودار نیرو-جابجایی، بعد از اولین جدایش، آسیب‌های ترکیبی لایه لایه شدگی رویه، شکست هسته و نهایتاً چروک رویه قابل مشاهده است. به علت قفل شدگی مکانیکی بخش‌های آسیب دیده، از کاهش انحنای سازه و بیشتر شدن سهم بخش‌های با استحکام بالاتر مانند پیچ‌ها و لمینیت نوك، روند افزایش نیرو در تست قابل تفسیر است. بر اساس تحلیل عددی صورت گرفته شروع آسیب از محل اتصال هسته به رویه اتفاق افتاده است. مقایسه نتایج عددی و تجربی با کمتر از ۱٪ اختلاف در شناسایی بار کماتش در جدول ۲ انجام شده است. انعطاف پذیری بیشتر مواد استفاده شده در تست تجربی له شدگی محل گرفتگی گیره‌های تست فشار علت بالابودن اختلاف جابجایی تجربی و جابجایی عددی شناسایی شده است. علت انعطاف پذیری بیشتر سازه در مقایسه با مقادیر تئوری می‌تواند عدم رعایت شدن در صدهای رزین و هاردنر در حجم‌های کم تولید هر بیج باشد. اطلاع از مقدار استحکام فشاری و مود آسیب رخ داده (کمانش موضعی پوسته و در نهایت جداسازی رویه از هسته) راه را برای انجام طراحی‌های آتی و تقویت سازه برای ارتقای استحکام فشاری آن باز خواهد کرد.

## References

- [1] Wang, X., Pont-Lezica, I., Harris, J. M., Guild, F. J., & Pavier, M. J., Compressive failure of composite laminates containing multiple delaminations. *Composites Science and Technology*, 2005. 65(2): 191-200. [DOI:10.1016/j.compscitech.2004.06.010](https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2004.06.010)
- [2] Aslan, Z. and M. Şahin, "Buckling behavior and compressive failure of composite laminates containing multiple large delaminations". *Composite Structures*, 2009. 89(3):382-390. [DOI:10.1016/j.compstruct.2008.08.011](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2008.08.011)
- [3] Truxel, A., Grenestedt, J. L., & Caccese, V. (2009). Doubly Curved Composite Sandwich Panels for Hybrid Composite/Metal Ship Structures (No. C2004015RPT05). *Defense Technical Information Center*. <https://search.worldcat.org/title/495783505>
- [4] Gao, Y. and M.S.H. Fatt, Local facesheet pulse buckling in a curved, composite sandwich panel. *Composite Structures*, 2013. 104: 249-260. [DOI:10.1016/j.compstruct.2013.04.037](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.04.037)
- [5] Liu, J., Qiao, W., Liu, J., Xie, D., Zhou, Z., Ma, L., & Wu, L., The compressive responses of glass fiber composite pyramidal truss cores sandwich panel at different temperatures. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2015. 73: 93-100. [DOI:10.1016/j.compositesa.2015.03.004](https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.03.004)
- [6] Dehabadi, A.M., G.H. Rahimi, and R. Rahmani, Experimental investigation on core shape effect on compressive properties of sandwich structures with composite skins, corrugated composite core and foam. *Modares Mechanical Engineering*, 2015. 15(4). [DOI: 20.1001.1.10275940.1394.15.4.14.6](https://doi.org/10.1001.1.10275940.1394.15.4.14.6)
- [7] Khorramabadi, R., Besharat Ferdosi, S., (2023). "Post-buckling and vibration analysis of double-curved sandwich panels with SMA embedded faces", *Composites Part C*, 12. [DOI:10.1016/j.jcomc.2023.100419](https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2023.100419)
- [8] Szekrényes, A. (2021). "Mechanics of shear and normal deformable doubly-curved delaminated sandwich shells with soft core". *Composite Structures*, 258. [DOI:10.1016/j.compstruct.2020.113196](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113196)
- [9] Karthikeyan, R., R. Sridhar, and S.G. Kumar, Hardness and buckling strength of different material panels for a wing box structure with FE analysis. *Materials Today: Proceedings*, 2020. 33: 4509-4514. [DOI:10.1016/j.matpr.2020.08.003](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.003)
- [10] Asjodi, P., Hosseini Farrash, M. "Experimental investigation of vibration and buckling behavior of sandwich panels reinforced with nanoparticles". Master's thesis in aerospace engineering, <https://shahroodut.ac.ir/fa/sec/index.php?id=23>. (2020).
- [11] Mokhtari, M., Nazari, F., Taherkhani, M., Aliakbarian, H., & Radiom, S., Design and measurement of the first Iranian sandwich Radome panel for C-band weather radar application. *Journal of Science and Technology of Composites*, 2019. 6(2): 234-241. [DOI:10.22068/jstc.2018.79074.1412](https://doi.org/10.22068/jstc.2018.79074.1412)
- [12] Bahmani Nejad, M., Eskandari-Jam, J., Mokhtari, M. and Mirzaei, A. "Design and fabrication of double-curved joints of weather radar radome sandwich panels under bending load", [Master's thesis in aerospace engineering, Malek-Ashtar University](#), (2019).