



# Evaluation of the Strength of the Composite-insert Reinforced with Nanoparticles and Investigation of the Effect of Wet Environmental Conditions

Majid Mokhtari<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Faculty Member, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

## ARTICLE INFO

## ABSTRACT

### Article Type:

Original Research

**Received:** 01.22.2024

**Revised:** 03.05.2024

**Accepted:** 06.02.2024

### Keyword:

Composite Insert Joints

Insert

Sandwich Panel

Pull-out Test

### \*Corresponding Author:

Majid Mokhtari

Email: [m\\_mokhtari@tvu.ac.ir](mailto:m_mokhtari@tvu.ac.ir)

The Joints are important elements of engineered structures. Sandwich and polymer structures utilize insert joints. The design of these joints, like other ones, must prevent damage in the connection area. Several studies have been conducted on insert joints to improve their load capacity. It is recommended that telecommunications structures consider the use of non-metallic connections to prevent interference with wave transmission and unwanted radiation effects. One potential solution for addressing environmental conditions and reducing metal in telecommunications radiation is the use of composite metal connections. In this article, the possibility of replacing metal samples with composite insert joints reinforced with alumina nanoparticles is explored. To evaluate the efficacy of composite samples in varying environmental conditions, an analysis of their moisture absorption was conducted. The outcomes of both the strength and environmental tests provided evidence that composite samples can serve as a viable substitute for metal-embedded joints.



---

**EXTENDED ABSTRACT**

---

**Introduction**

Joints are important elements of engineered structures. Sandwich and polymer structures utilize insert joints. Several studies have been conducted on insert joints to improve their load capacity. In this article, the possibility of replacing metal samples with composite insert joints reinforced with alumina nanoparticles is explored. In order to evaluate the efficacy of composite samples in varying environmental conditions. The outcomes of both the strength and environmental tests provide evidence that composite samples can serve as a viable substitute for metal embedded joints.

**Methodology**

The insert system consists of a detachable part and a structural fixed part. The removable part can be a screw or other threaded component that fits into a nut-like part. This threaded component is connected to the core of the structure using an embedding compound. This bonding compound is usually a two-part epoxy resin.

The effect of using nanoparticles in epoxy on its strength is shown in Figure 1.

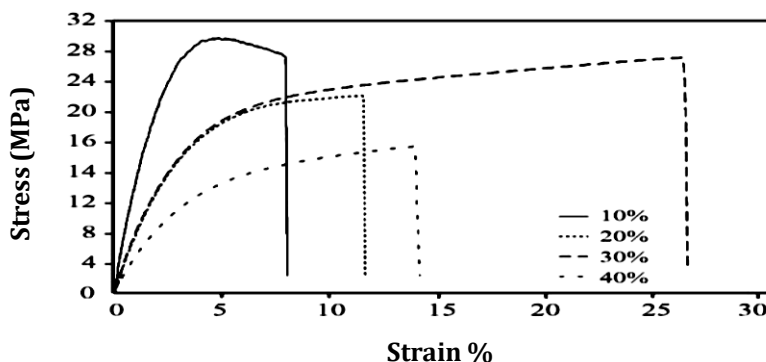


Figure 1. Stress-strain diagram for polyester-nanosilica nanocomposite samples with different percentages of nanoparticles baked at ambient temperature.

The studies conducted in the field of built-in connections have a wide range. Due to the non-standard shape and products in these connections, every company and every research team has put forward suggestions to improve the load capacity of this type of connection. Avila et al. [3] in 2010 investigated the delamination effect of sandwich nanocomposite under impact load. They tested the impact with two different energies of 5 and 75 joules. Their results showed that the addition of 5% nanoparticles increases the amount of absorbed energy.

Considering the lower costs of producing composite built-in joints compared to metal samples, the use of these samples has been considered as an operational option so that they can be used in the industry. In this article, the possibility of replacing the composite built-in joints reinforced with alumina nanoparticles instead of using metal samples has been investigated. The pull-out test is used to evaluate the strength of the connection. To

investigate the effect of nanoparticles on the moisture absorption of samples, a moisture absorption test was conducted to compare the samples so that their effectiveness in relation to environmental conditions was also investigated.

## Results and discussion

Alumina nanoparticles were used in the present study. The main purpose was to compare the load capacity results of the connection compared to the sample of common metal-embedded connections. The method of mixing these nanoparticles was that the weight percentage of these particles was first mixed with a mechanical stirrer for 20 minutes and then an ultrasonic bath was used in three 20-minute sessions. The base resin was epoxy resin 828.

Reinforced resin samples were molded as dumbbells according to the ASTM-D 638 standard, and the tensile test results of different percentages are shown in Table 1.

**Table 1. Tensile strength test results of nanocomposites.**

Tensile Strength (MPa)	Sample	Elongation at break (%)	Nanoparticle
27.47	Al-0	3.4	Pure resin
29.92	Al-0.5	3.6	Alumina -0.5 %
26.43	Al-2	3.15	Alumina -2 %
24.84	Al-5	3.46	Alumina -5 %



**Figure 2. Built-in fittings sample test fixture and Galdabini tensile testing machine.**

The test results were reported for at least three replicate samples and the average numbers were reported as the final parameter. Pull-out test for composite and metal samples was carried out with the Galdabini machine (Figure 2). To determine the main sample to make the connection and perform the pull-out test, numerical analysis was performed on the connection to select the best sample from among the different structures. The results of the parametric evaluation of the connection, which was undertaken in the numerical analysis, will be presented in future articles.

The process of numerical analysis was carried out using grid size optimization. To confirm the results, the comparison of the results with the experimental sample made with the aluminum sample was used. An explicit solver and approximately 100 thousand Tet elements were used for the numerical analysis. The connection between the pot and the insert was fully modeled and the pullout load was modeled as the pressure caused by the bolt passing through the insert. The test process was done by passing a screw through the insert. The force-displacement results were used as evaluation criteria for experimental

tests. The results obtained from the pull-out test of the composite samples are compared and reported with the pull-out test results of the metal connection sample in Table 2.

**Table 2. Comparison of the FEM and Experimental results.**

%Discrepancy	Max. Pull-out load - FEM (N)	Max. Pull-out load - Experimental (N)	Hole size (mm)	Tensile Modulus	
15.34	-	13231	8	35	Composite-insert
	9514.11	8248	8	70	Metallic-insert

**Table 3. Environmental test results during wet conditions (ASTD D570).**

Moisture absorption (%)	Sample
1.007	AL-0
0.81	AL-0.5
1.08	AL-2
1.001	AL-5

## Conclusion

Table 2 shows the results of the experimental test on composite and metal samples. The comparison between experimental and numerical results indicated an acceptable difference of 15.34%. The error was due to incomplete modeling of the insert's connection to the vase and failure to consider possible manufacturing defects.

After mixing different nanoparticles and performing mechanical tests, the research results showed that using alumina nanoparticles increases strength compared to pure resin. Additionally, the pull-out strength of the built-in connection was approximately 1.6 times higher than the metal sample, which expands the practical use of these connections. The sample containing 0.5% alumina had minimal moisture absorption compared to other samples, making it the best choice for outdoor use (Table 3).

## Acknowledgement

Hereby, I am grateful for the efforts of Mr. Hamid Abdoli, Ali Mardanshahi and Mrs. Mehri Mahmoudi who helped me in completing this project.



## ارزیابی استحکام اتصال توکار کامپوزیتی تقویت شده با نانوذرات و بررسی اثر شرایط محیطی مرطوب

مجید مختاری<sup>۱\*</sup>

۱- عضو هیات علمی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

### چکیده

### اطلاعات مقاله

اتصالات از مهم‌ترین بخش‌های سازه‌های مهندسی هستند. برای سازه‌های ساندویچی و پلیمری از اتصالات توکار استفاده می‌شود. مانند طراحی دیگر اتصالات، طراحی این اتصالات نیز باید به صورتی باشد که آسیب از ناحیه اتصال اتفاق نیفتد. مطالعات زیادی در خصوص اتصالات توکار انجام شده است که همه با هدف ارتقای ظرفیت بار اتصال انجام شده‌اند. اتصالاتی که در سازه‌های مخابراتی استفاده می‌شوند باید حتی‌الامکان غیرفلزی باشند تا مانعی در برابر عبور امواج یا بروز تشعشع ناخواسته نباشند. کامپوزیتی کردن اتصالات فلزی به‌عنوان یکی از ایده‌های عملیاتی برای مقابله با شرایط محیطی و حذف فلزات در مقابل تشعشعات مخابراتی است. در این مقاله به بررسی امکان جایگزینی اتصالات توکار کامپوزیتی تقویت شده با نانوذرات آلومینا به‌جای استفاده از نمونه‌های فلزی پرداخته شده است. برای بررسی میزان تأثیرپذیری نمونه‌های کامپوزیتی در برابر شرایط محیطی، به بررسی جذب رطوبت در نمونه‌های ساخته شده پرداخته شده است. نتایج استحکامی و محیطی مؤید استفاده از نمونه‌های کامپوزیتی به‌جای اتصالات توکار فلزی است.

### نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۰۲

بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۱۵

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۱۳

### کلید واژگان:

اتصالات توکار کامپوزیتی  
اتصال توکار  
ساندویچ پنل  
آزمون بیرون کشیدن

\*نویسنده مسئول: مجید مختاری

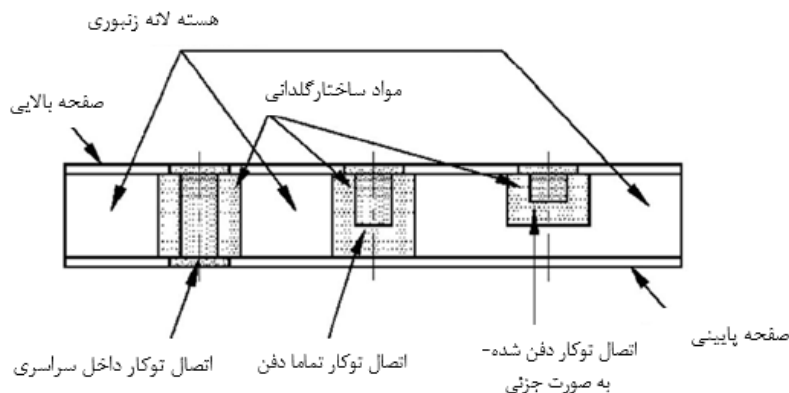
پست الکترونیکی:

[m\\_mokhtari@tvu.ac.ir](mailto:m_mokhtari@tvu.ac.ir)



## مقدمه

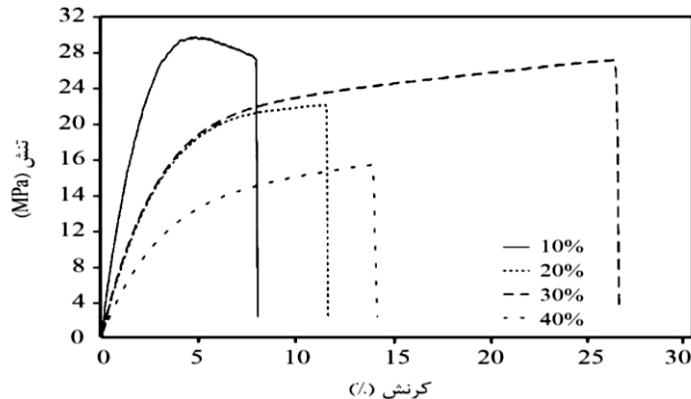
اتصال توکار یکی از انواع اتصالات جداشدنی است که اتصال پنل‌های ساندویچی و دیگر قطعات سازه‌ای مانند قاب‌ها، پروفیل‌ها، بست‌ها و همچنین نصب و استقرار تجهیزاتی مانند جعبه‌ها، خطوط تدارکاتی و داکت‌ها را فراهم می‌سازد. سیستم اتصال توکار شامل یک قسمت جداشدنی و یک قسمت ثابت سازه‌ای است. قسمت جداشدنی می‌تواند یک پیچ یا سایر قطعات رزوه‌دار باشد. این جزء رزوه‌دار با به‌کارگیری یک بخش دفن‌شده به هسته سازه متصل است. موادی که برای دفن اتصالات توکار استفاده می‌شود معمولاً از جنس رزین اپوکسی دو جزئی است. شکل ۱ اجزای یک نوع استاندارد سیستم اتصال توکار در سازه ساندویچ پنل را نشان می‌دهد.



شکل ۱.۱ اجزای اتصال در سیستم اتصال توکار [۱].

سه دسته‌بندی کلی اتصال توکار وجود دارد که بر اساس روش اتصال به هسته سازه ساندویچی تفکیک می‌شوند. این سه نوع عبارتند از:

- **دسته اول:** اتصال هم‌زمان اتصال توکار به هسته ساندویچ پنل در حین تولید آن
- **دسته دوم:** نصب اتصال توکار به یک ساندویچ پنل موجود با استفاده از رزین ترموست؛ عملیات دفن (کاشت) اتصال توکار
- **دسته سوم:** اتصال از طریق گیره مکانیکی یا پیچ به یک ساندویچ پنل دیگر. نانوذرات ویژگی‌های جدید یا توسعه‌یافته‌ای را متناسب با مشخصاتشان (اندازه، پراکندگی، ریخت‌شناسی، فاز و غیره) از خود بروز می‌دهند. تأثیر استفاده از نانوذرات در زمینه اپوکسی بر استحکام آن در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. نمودار تنش-کرنش برای نمونه‌های نانوکامپوزیتی پلی‌استر-نانوسیلیکا با درصدهای مختلف نانوذرات پخت‌شده در دمای محیط [۲].

مطالعاتی که در حوزه اتصالات توکار انجام شده است از گستردگی زیادی برخوردار است. با توجه به استاندارد نبودن شکل و زائده‌های موجود در این اتصالات هر شرکت و هر تیم تحقیقاتی پیشنهادهایی را برای ارتقای ظرفیت بار این نوع اتصالات مطرح کرده است.

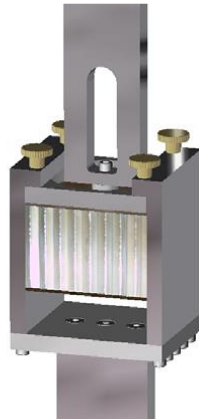
آویلا<sup>۱</sup> و همکاران [۳] در سال ۲۰۱۰ اثر لایه‌لایه‌شدن نانوکامپوزیت ساندویچی را تحت بار ضربه بررسی کردند. آن‌ها ضربه با دو انرژی مختلف ۵ و ۷۵ ژول را آزمایش کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که اضافه کردن ۵ درصد نانو، میزان انرژی جذب‌شده را افزایش می‌دهد. شرایط آزمون و فیکسچر آن‌ها مطابق شکل ۳ است و نتایج به‌دست‌آمده در شکل ۴ نشان داده شده است. هندسه نمونه آزمون به‌صورت مربعی و دارای ابعاد ۱۲۰ mm در ۱۲۰ mm است؛ ضخامت ساندویچ‌پنل موردآزمون با اتصال توکار برابر ۲۰/۸ میلی‌متر است. سرعت بارگذاری در این پژوهش ۱/۲۷ mm/s در نظر گرفته شده است. نتایج این آزمون در شکل ۴ نشان داده شده است که در آن مودهای مختلف آسیب گزارش شده است.

شکل ۴ مودهای مختلف واماندگی اتصال را بدین گونه نشان می‌دهد:

- واماندگی برشی هسته
- جدایش صفحه ساندویچ‌پنل و گلدان<sup>۲</sup> رزینی
- دیگر واماندگی‌های محلی، از جمله جدایش صفحه بالایی و گلدانی.

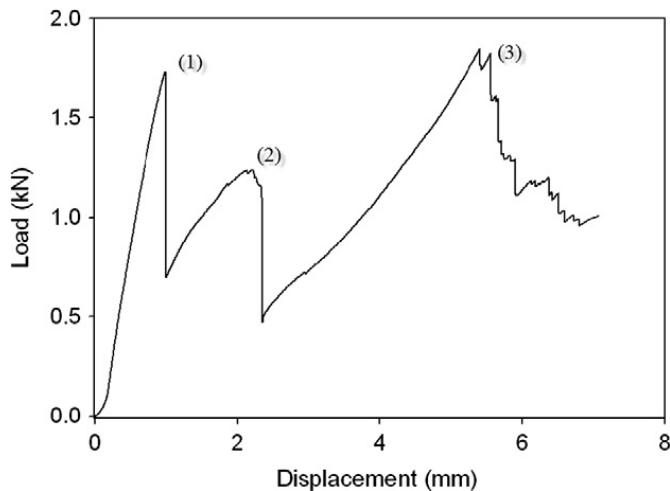
<sup>۱</sup> Avila

<sup>۲</sup> Potting



شکل ۳. شماتیک نمونه با اتصال توکار و فیکسچر و چیدمان آزمون [۳].

منحنی نیرو-جابجایی برای نمونه آزمون ساندویچ پنل با اتصال توکار در شکل ۴ آمده است:



شکل ۴. منحنی نیرو-جابجایی برای نمونه آزمون بیرون کشیدن اتصال توکار [۳].

ونکاتانارایانان و استانلی<sup>۱</sup> [۴] در سال ۲۰۱۲ پنج مدل مختلف از ورق‌های نانو کامپوزیت شش‌لایه را با سه نوع رزین مختلف تحت برخورد پرتابه سرعت متوسط مطالعه کردند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان می‌دهد که با افزایش درصد نانوذرات، میزان استهلاک انرژی در ماده کامپوزیت افزایش می‌یابد و همچنین میزان آسیب در رزین‌های خالص بیشتر از نمونه‌های نانو کامپوزیت می‌باشد.

جاجام و تیبور<sup>۲</sup> [۵] در سال ۲۰۱۲ رفتار شکست کامپوزیت در مقابل بارگذاری شبه‌استاتیکی و دینامیک را بررسی کردند. هدف آن‌ها مقایسه بین میکروکامپوزیت و نانوکامپوزیت بوده است. در این بررسی از رزین اشباع از سیلیکا بهره

<sup>1</sup> Venkatanarayanan & Stanley

<sup>2</sup> Jajam & Tippur

گرفته‌اند. نتایج بررسی آن‌ها نشان می‌دهد که افزودن مواد نانو و میکرو به کامپوزیت، استحکام شکست را در بارگذاری شبه‌استاتیکی و دینامیکی افزایش می‌دهد. همچنین سطح شکست در نانوکامپوزیت، زبری کمتری نسبت به میکروکامپوزیت دارد.

بر اساس هندبوک ECSS استحکام بیرون کشیدن باید حداقل بعد از دو روز از نصب اتصال توکار اندازه‌گیری شود. همچنین منحنی نیرو- تغییر شکل، برای محاسبه استحکام بیرون کشیدن اتصال توکار به کار می‌رود. طبق استاندارد ECSS معیار بیرون کشیده شدن یک اتصال توکار به اندازه ۱ تا ۲ میلی‌متر بالای ورق ساندویچ پنل معیار اصلی برای اعلام اختتام آزمون است [۳].

ناگوین<sup>۱</sup> و همکاران [۶] به بررسی آزمون اتصال توکار یک ساندویچ پنل با رویه ساندویچ پنل از جنس کربن/اپوکسی و لایه چینی [۴۵/۰] پرداختند. مواد مور استفاده برای گلدانی آن‌ها عبارتند از: ۶۳۹۸ A&B Magnobone و Huntcell و Epocast ۱۶۱۸D/B.

طبق مطالعات صفراآبادی فراهانی و بیدگلی [۷] هندسه اتصال توکار و جنس هسته در نوع شکست این نوع اتصال تأثیر می‌گذارد. همچنین وظیفه اصلی چنین اتصال توکاری، انتقال بار به پوسته ساندویچ پنل است. این اتصال توکار معمولاً تحت بار خارج صفحه کششی قرار می‌گیرد و استحکام اتصال در برابر این بارگذاری یک عامل محدودکننده اتصال است.

سونگ<sup>۲</sup> و همکارانش [۸] به مطالعه آزمایشگاهی استحکام اتصال توکار در ساندویچ پنل می‌پردازند. ابعاد نمونه‌های آزمون بیرون کشیدن ۱۲۰ در ۱۲۰ میلی‌متر مربع و برای آزمون برش داخل صفحه ۶۰ در ۱۲۰ میلی‌متر مربع است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که اگرچه واماندگی اتصال توکار از ضخامت هسته و تراکم آن تأثیر می‌پذیرد اما بار نهایی واماندگی آن تحت بار کنده شدن به شدت به ضخامت صفحه ساندویچ پنل وابسته است.

آتاش و بسماچی<sup>۳</sup> [۹] به مطالعه رفتار آسیب ماده پرکننده محل جاسازی اتصال توکار در ساندویچ پنل پرداخته است. ساندویچ پنل‌های نمونه برای آزمون در این تحقیق دارای پوسته‌هایی از جنس کامپوزیت شیشه/اپوکسی هستند. در این تحقیق هسته ساندویچ پنل از جنس فوم PVC است. ماده پرکننده گلدانی متشکل است از: رزین اپوکسی، هاردنر و الیاف ریزشده شیشه در داخل آن (۴ درصد وزنی). قطر ماده پرکننده جاسازی و فاصله لبه ساندویچ پنل نمونه تا مرکز سوراخ پیچ به عنوان دو متغیر اصلی تغییردهنده ابعاد اتصال در نظر گرفته شده‌اند. در این مقاله آزمایش بر روی نمونه‌ها تحت برش انجام گرفته است.

بونیاوانیچاکول<sup>۴</sup> و همکارانش [۱۰] به مطالعه آزمایشگاهی و عددی اتصالات توکار در سازه ساندویچ پنل پرداخته است. نمونه‌های آزمون ساندویچ پنل ساخته شده از پوسته کامپوزیتی کربن/اپوکسی با لایه چینی شبه-ایزوتروپیک است. همچنین هسته ساندویچ پنل نیز لانه زنبوری نومکس است. اتصال توکار در چسب گلدانی Scotch-Weld™ ۳۵۰۰- ۲B/A شرکت ۳M دهن شده است. ابعاد نمونه آزمون نیز ۲۵/۲ × ۱۴۰ × ۱۴۰ mm است.

سازه‌های ساندویچی شکل‌های متنوعی دارند که ساختارهای T شکل از پرکاربردترین نمونه‌های تجاری هستند [۱۱] در این بین نوآوری‌های زیادی روی این نوع سازه‌ها پیشنهاد شده است که ایجاد ساختارهای تابعی از آن دست است [۱۲].

از موضوعاتی که اخیراً در خصوص سازه‌های ساندویچی و اتصالات آن‌ها پرداخته شده است می‌شود به موارد زیر اشاره کرد که در آن‌ها بررسی فرایند طراحی برای نمونه‌های تجاری خاص و بررسی میزان عمر اتصال را اشاره کرد.

<sup>1</sup> Nguyen

<sup>2</sup> Song

<sup>3</sup> Atas & Basmaci

<sup>4</sup> Bunyawaniachakul

تحمل آسیب، از موضوعات مورد علاقه مهندسان است که برای تخمین عمر قطعات مورد استفاده قرار می‌گیرد. گویال<sup>۱</sup> و همکارانش [۱۳] به بررسی میزان تحمل آسیب اتصال‌های ساندویچی پرداختند. تحلیل تجربی و عددی استفاده‌شده در این مقاله برای ارزیابی سازه ترک‌دار استفاده شد. با ارزیابی استحکامی، اتصال عمر قطعات متناسب با طول ترک اعمال‌شده (به‌عنوان آسیب) تخمین زده شد.

پلین<sup>۲</sup> و همکارانش [۱۴] به بررسی فرایند طراحی، ساخت و تست یک نمونه اتصال توکار که برای هلیکوپتر Clean Sky<sup>۲</sup> است پرداخته‌اند. آن‌ها با انجام دو نوع آزمون بیرون کشیدن و آزمون برشی به بررسی استحکام اتصال پرداختند و هندسه، ساختار و تعداد اتصال را برای استفاده در کاربرد خود بهینه کردند.

در پژوهشی دیگر الخزرجی<sup>۳</sup> و همکارانش [۱۵] به دست‌بندی روش‌های تولید سازه‌های ساندویچی پرداختند. ساخت اتصال توکار به‌عنوان بخشی از فرایند تولید سازه‌های ساندویچ است که در این مقاله مروری به آن پرداخته شده است. آن‌ها به بررسی روش‌های مختلف ساخت و میزان اختلاف نتایج مربوط به آزمون بیرون کشیدن اتصال توکار پرداخته‌اند. ماهیت این مقاله، مروری است و به‌عنوان یک راهنما برای ساخت اتصالات توکار می‌تواند استفاده شود.

با توجه به هزینه‌های پایین‌تر تولید اتصالات توکار کامپوزیتی در مقایسه با نمونه‌های فلزی، استفاده از این نمونه‌ها به‌عنوان یک گزینه عملیاتی و صنعتی مد نظر قرار گرفته است. در این مقاله به بررسی تجربی و عددی، امکان جایگزینی اتصالات توکار کامپوزیتی تقویت‌شده با نانوذرات آلومینا به‌جای استفاده از نمونه‌های فلزی پرداخته شده است. از آزمون بیرون کشیدن<sup>۴</sup> برای ارزیابی میزان استحکام اتصال استفاده شده است. بررسی میزان تأثیر شرایط محیطی با بررسی میزان جذب رطوبت به‌عنوان عامل اصلی افت خواص مواد پلیمری بر اساس استاندارد ASTM-D5۷۰ [۱۶] انجام شده است. برای بررسی نتایج به‌دست‌آمده و تحلیل‌های عددی از نرم‌افزار المان محدود ABAQUS استفاده شده است.

## نتایج تجربی

در این مقاله از نانوذره آلومینا استفاده شده است. هدف اصلی، مقایسه نتایج ظرفیت بار اتصال در مقایسه با نمونه اتصالات توکار فلزی متداول است (شکل ۵). نحوه اختلاط این نانوذره‌ها بدین صورت بوده است که درصد مد نظر وزنی از این ذرات ابتدا به مدت ۲۰ دقیقه با همزن مکانیکی مخلوط شد و بعد از آن در سه نوبت ۲۰ دقیقه‌ای در حمام آلتراسونیک گذاشته شد. رزین پایه، رزین اپوکسی ۸۲۸ است.

نمونه‌های رزین‌های تقویت‌شده با توجه استاندارد ASTM-D ۶۳۸ [۱۷] به‌صورت دمبلی قالب‌گیری شد و نتایج آزمون کشش درصدهای مختلف آن در جدول ۱ ارائه داده شده است.

جدول ۱. نتایج آزمون استحکام کششی نانوکامپوزیت‌ها.

نانوذره	جابه‌جایی تا شکست (%)	نمونه	استحکام کششی (MPa)
Pure resin	۳.۴	Al-۰	۲۷.۴۷
Alumina -۰.۵ %	۳.۶	Al-۰.۵	۲۹.۹۲
Alumina -۲ %	۳.۱۵	Al-۲	۲۶.۴۳
Alumina -۵ %	۳.۴۶	Al-۵	۲۴.۸۴

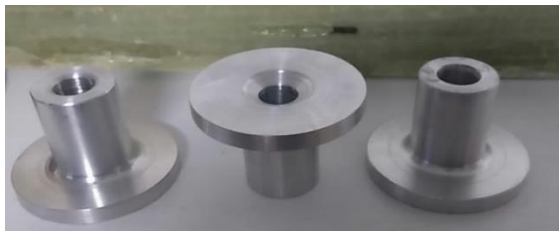
<sup>1</sup> Goyal

<sup>2</sup> Pelin

<sup>3</sup> Al-Khazraji

<sup>4</sup> Pull-out

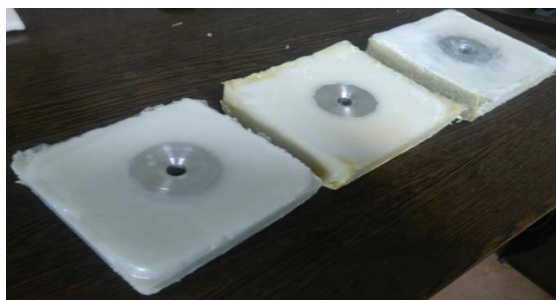
ساخت اتصال توکار کامپوزیتی با استفاده از قالب سیلیکونی (شکل ۶) انجام شد. نمونه‌های ساخته شده در رزین اپوکسی به صورت گلدانی درآمدند و از ساخت بخش ساندویچی برای جلوگیری از دخیل شدن عیوب ساختی صرف نظر شد (شکل ۷).



شکل ۵. اتصالات توکار فلزی ساخته شده از آلیاژ سری ۵۰۰۰.



شکل ۶. قالب گیری اتصال توکار کامپوزیتی و نمونه اتصال توکار ساخته شده از رزین اپوکسی ۸۲۸.



شکل ۷. نمونه اتصالات آماده شده برای آزمون بیرون کشیده شدن.

### روش انجام آزمایش

نتایج تجربی در دو دسته آزمون بیرون کشیدن و آزمون اندازه گیری میزان نفوذ رطوبت دسته بندی می شوند. آزمون بیرون کشیدن در فیکسچر و چیدمان ارائه شده در شکل ۸ و توسط دستگاه آزمون Galdabini در دانشگاه علم و صنعت انجام شده است. سرعت کشش دستگاه ۵ mm/min تنظیم شد و فرایند تا بروز شکستگی در گلدانی رزینی ادامه پیدا کرد.



شکل ۸. فیکسچر آزمون نمونه اتصالات توکار و دستگاه آزمون کشش Galdabini.

نتایج آزمون برای حداقل سه نمونه تکرار و میانگین اعداد به‌عنوان پارامتر نهایی گزارش شده است. آزمون بیرون کشیدن برای نمونه‌های کامپوزیتی و فلزی با دستگاه Galdabini با ظرفیت ۵ تن انجام شد (شکل ۸). آزمون‌های محیطی، بخش جدایی‌ناپذیر ارزیابی سازه‌هایی هستند که در شرایط سخت آب‌وهوایی به کار گرفته می‌شوند. آزمون جذب رطوبت به‌عنوان یکی از این آزمون‌ها است که در این پژوهش بدان پرداخته شده است.



شکل ۹. نمونه‌های استفاده‌شده برای ارزیابی میزان جذب رطوبت ساخته‌شده بر اساس استاندارد ASTM D570 [۱۶]

برای سازه‌هایی که در محیط بیرون قرار دارند بررسی میزان جذب رطوبت از اهمیت بالایی برخوردار است. از این رو در این پژوهش به بررسی میزان جذب رطوبت نمونه‌های نانوکامپوزیتی در دمای محیط پرداخته شده است. آزمون بررسی میزان نفوذ رطوبت در نمونه‌های ساخته‌شده بر اساس استاندارد آزمون جذب رطوبت ASTM D570 [۱۶] برای نمونه‌های دیسکی (شکل ۹) انجام شده است.

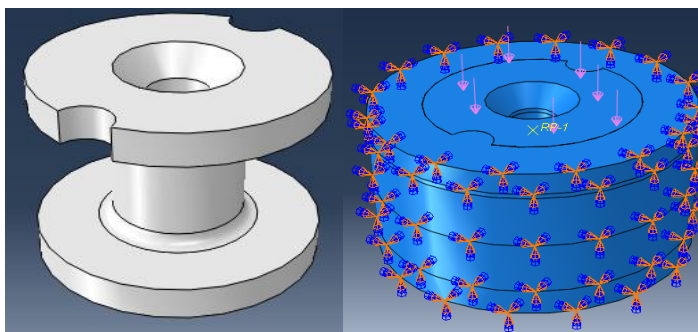
فرایند آزمون به این صورت است که مطابق استاندارد نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آب مقطر در دمای  $23 \pm 1$  درجه سانتی‌گراد ( $73.4 \pm 1.8$  درجه فارنهایت) غوطه‌ور شد. بعد از این مرحله، توزین هر دو هفته یک‌بار انجام می‌شود تا زمانی که افزایش جرم بین یک دوره دوهفته‌ای بیش از ۱ درصد وزن کل یا مقدار ۵ میلی‌گرم تفاوت نداشته باشد. پس از آب‌کشی نمونه و خشک کردن روی آن با دستمال، وزن دقیق نمونه حداقل سه بار اندازه‌گیری می‌گردد و مقدار میانگین به‌عنوان وزن نمونه‌ای که رطوبت به خود جذب کرده است گزارش می‌شود. مقایسه این مقدار با وزن قبل از آزمون، میزان جذب رطوبت را نشان می‌دهد.

### تحلیل عددی

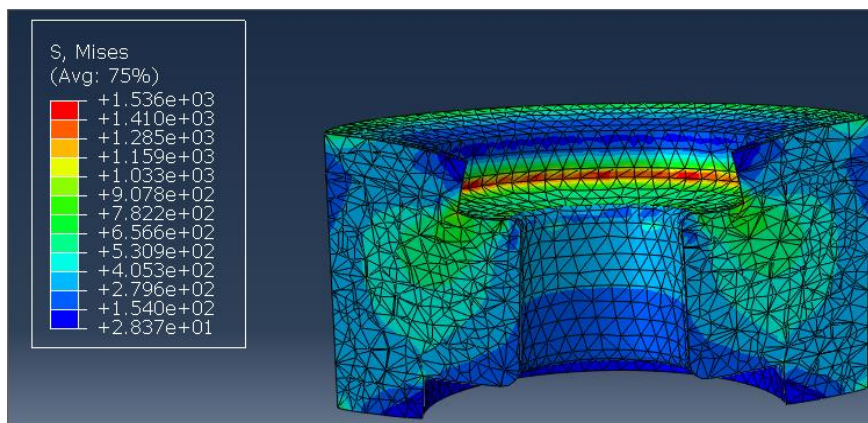
به‌منظور مشخص شدن نمونه اصلی برای ساخت اتصال و انجام آزمون بیرون کشیدن، تحلیل عددی روی اتصال انجام شد تا از بین ساختارهای مختلف، بهترین نمونه انتخاب شود. فرایند تحلیل عددی با استفاده از بهینه‌سازی

اندازه شبکه<sup>۱</sup> انجام شد. طریقه انجام کار بدین صورت است که برای سنجش دقت، نتایج بیشینه تنش برشی در گلدانی پلیمری با تغییر تعداد المان‌های شبکه، مقایسه شد. افزایش تعداد المان‌ها به افزایش هزینه‌های محاسباتی منجر می‌شود. نتایج در هر گام افزایش تعداد المان، برداشت و با گام قبل مقایسه شده است. تعداد المانی که اختلاف نتایج آن با تعداد المان قبلی انتخاب شده، اختلافی کمتر از ۵ درصد داشت، به عنوان تعداد المانی که جواب‌ها را از ابعاد شبکه مستقل می‌کند گزارش شد. برای تأیید نتایج<sup>۲</sup> از مقایسه نتایج بیشینه نیروی عمودی در دو نمونه عددی و تجربی استفاده شد (جدول ۲).

برای تحلیل عددی از تحلیلگر Explicit و از ۱۰۰۱۲۵ المان Tet استفاده شد. اتصال بین گلدانی<sup>۳</sup> و اتصال توکار به صورت کامل مدلسازی شده است و بار بیرون کشیدن به صورت فشار ناشی از گل پیچ عبوری از اتصال توکار، مدلسازی شده است (شکل ۹).



شکل ۹. مدل هندسی و شرایط مرزی مدلسازی شده برای اتصال اتصال توکار به گلدانی.

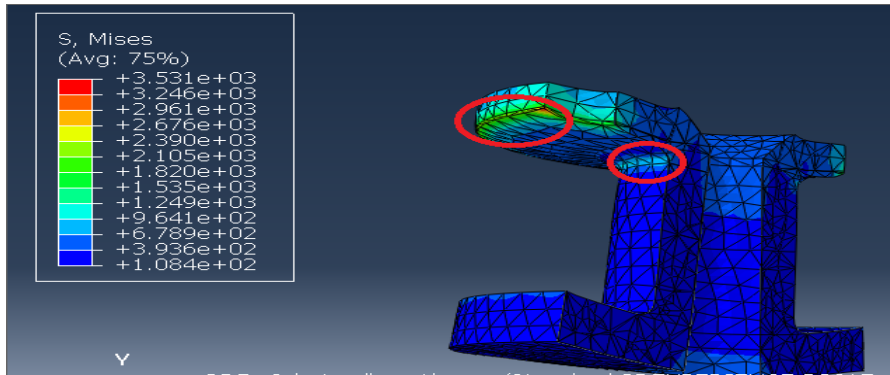


شکل ۱۰. کیفیت شبکه استفاده شده برای گلدانی در تحلیل Explicit برای نمونه فلزی در آزمون بیرون کشیدن نمونه فلزی.

<sup>۱</sup> Mesh study

<sup>۲</sup> Verification

<sup>۳</sup> Potting



شکل ۱۱. بیشترین بار معادل فون مایسز در بارگذاری بیرون کشیدن نمونه اتصال توکار فلزی.

کیفیت شبکه در گلدانی و اتصال توکار و همچنین بیشینه تنش اعمالی در حین آزمون بیرون کشیده شدن در شکل ۱۰ و شکل ۱۱ نشان داده شده است. مطابق انتظار بیشترین تنش در اتصال توکار در لبه‌های بیرونی و گلوبی اتصال توکار مشاهده شد (شکل ۱۱).

### نتایج و جمع‌بندی

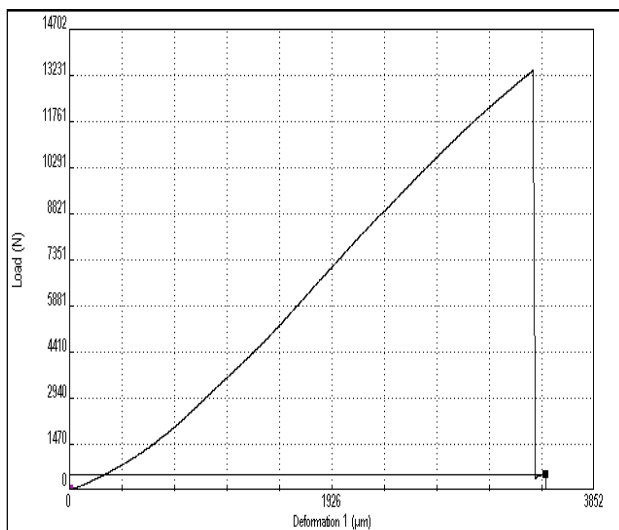
بررسی نتایج در دو بخش زیر به‌طور مجزا آورده شده است.

### آزمون بیرون کشیدن

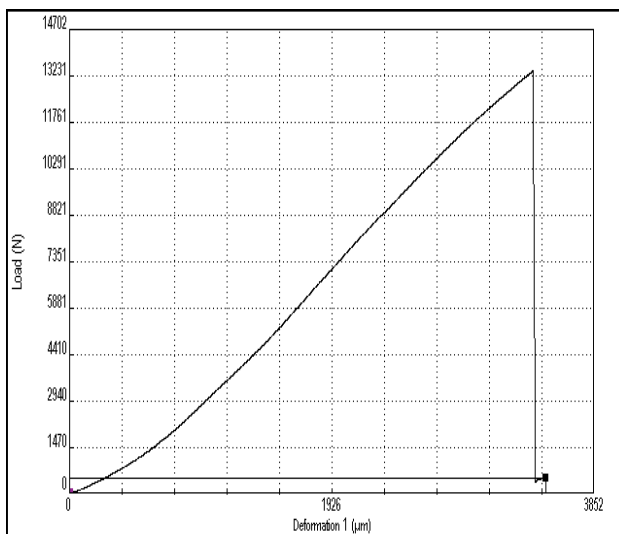
فرایند آزمون با عبور یک پیچ از داخل اتصال توکار انجام شد (شکل ۱۲). نتایج نیرو-جابجایی به‌عنوان معیار ارزیابی آزمون‌های تجربی مورد استفاده قرار گرفت. بالاترین مقادیر حاصل شده از آزمون بیرون کشیدن برای نانوذره آلومینا در شکل ۱۳ نشان داده شده است. نتایج به‌دست‌آمده از آزمون بیرون کشیدن نمونه‌های کامپوزیتی با نتایج آزمون بیرون کشیدن نمونه اتصال فلزی (شکل ۱۵) در جدول ۲ مقایسه و گزارش شده است.



شکل ۱۲. آزمون بیرون کشیدن و موضع آسیب در اتصال توکار.



شکل ۱۳. نمودار نیرو- جابه‌جایی نمونه آزمون بیرون کشیدن اتصال توکار ۱-۰.۵% Al.



شکل ۱۴. نمودار نیرو- جابه‌جایی نمونه آزمون بیرون کشیدن اتصال توکار فلزی.

## جدول ۲. مقایسه نتایج عددی و تجربی.

مدول کشی	قطر سوراخ (mm)	بیشترین نیروی بیرون کشیده‌شدن - تجربی (N)	بیشترین نیروی بیرون کشیده‌شدن - عددی (N)	% اختلاف
۳۵	۸	۱۲۲۳۱	-	۱۵.۳۴
۷۰	۸	۸۲۴۸	۹۵۱۴.۱۱	

## آزمون جذب رطوبت

نتایج به‌دست‌آمده از آزمون جذب رطوبت به‌صورت جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳. نتایج آزمون شرایط محیطی.

نمونه	جذب رطوبت (%)
AL-۰	۱.۰۰۷
AL-۰.۵	۰.۸۱
AL-۲	۱.۰۰۸
AL-۵	۱.۰۰۱

نتایج به‌دست‌آمده از آزمون تجربی بین نمونه‌های کامپوزیتی و فلزی در جدول ۲ نشان داده شده است. مقایسه بین نتایج تجربی و عددی نیز مبین اختلاف قابل‌قبول بین نتایج عددی و تجربی است (۱۵/۳۴ درصد). علت بروز این خطا نیز مدلسازی اتصال اتصال توکار به گلدانی به‌صورت کامل و در نظر گرفتن عیوب ساختی که محتمل هستند است. با بررسی نتایج به‌دست‌آمده از اختلاط نانوذرات مختلف و انجام آزمون‌های مکانیکی، جمع‌بندی نتایج حاصل از این تحقیق به این صورت است:

- استفاده از نانوذرات آلومینا در مقایسه با رزین خالص، افزایش استحکام بیشتری را به‌وجود می‌آورد.
  - استحکام بیرون کشیده‌شدن اتصال توکار حدود ۱/۶ برابر بیشتر نسبت به نمونه فلزی است که این خود می‌تواند استفاده از این اتصالات را به‌صورت کاربردی گسترش دهد.
- میزان جذب رطوبت در نمونه حاوی ۰/۵ درصد آلومینا در مقایسه با نمونه‌های دیگر کمینه و بهترین شرایط را برای استفاده در شرایط محیطی بیرون دارد.

## تشکر و قدردانی

بدین وسیله از زحمات آقایان حمید عبدلی، علی مردان‌شاهی و سرکار خانم مهری محمودی که در تکمیل این پروژه یاری رساندند، بسیار سپاسگزاریم.

## References

- [1] European Cooperation for Space Standardization. (2011). *Space engineering; Insert design handbook* (ECSS-E-HB-32-22A). ECSS. <https://pdfcoffee.com/ecss-e-hb-32-22a-insert-design-handbook-pdf-free.html>
- [2] Ershad Langroudi, A., & Akkaf, M. H. (2017). Improvement in the mechanical properties of polyester nanocomposite with nano-silica prepared by sol-gel method. *Journal of Science and Technology of Composites*, 3(4), 419-428. [https://jstc.iust.ac.ir/article\\_22899.html?lang=en](https://jstc.iust.ac.ir/article_22899.html?lang=en)
- [3] Avila, A. F., Carvalho, M. G. R., Dias, E. C., & da Cruz, D. T. L. (2010). Nano-structured sandwich composites response to low-velocity impact. *Composite Structures*, 92(3), 745-751. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.09.010>
- [4] Venkatanarayanan, P. S., & Stanley, A. J. (2012). Intermediate velocity bullet impact response of laminated glass fiber reinforced hybrid (HEP) resin carbon nano composite. *Aerospace Science and Technology*, 21(1), 75-83. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2011.05.007>

- [5] Jajam, K. C., & Tippur, H. V. (2012). Quasi-static and dynamic fracture behavior of particulate polymer composites: A study of nano- vs. micro-size filler and loading-rate effects. *Composites Part B: Engineering*, 43(8), 3467-3481. <https://doi.org/10.1016/j.compsitesb.2012.01.042>
- [6] Nguyen, K-H., Park, Y-B., Kweon, J-H., & Choi, J-H. (2012). Failure behaviour of foam-based sandwich joints under pull-out testing. *Composite Structures*, 94(2), 617-624. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.08.027>
- [7] Safarabadi Farahani, M., & Bigdeli, H. (2016). Finite element study of the failure mode and influence of effective Parameters on strength of sandwich structure joints used in satellite. *Aerospace Knowledge and Technology Journal*, 5(3 (special Issue)), 103-115. [https://www.astjournal.ir/article\\_23011.html](https://www.astjournal.ir/article_23011.html)
- [8] Song, K-I., Choi, J-Y., Kweon, J-H., Choi, J-H., & Kim, K-S. (2008). An experimental study of the insert joint strength of composite sandwich structures. *Composite Structures*, 86(1-3), 107-113. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2008.03.027>
- [9] Atas, C., & Basmaci, A. (2015). Damage behavior of potting materials in sandwich composites with pinned joints. *Science and Engineering of Composite Materials*, 22(5), 517-523. <https://doi.org/10.1515/secm-2013-0176>
- [10] Bunyawanchakul, P., Castanie, B., & Barrau, J. J. (2005). Experimental and Numerical Analysis of Inserts in Sandwich Structures. *Applied Composite Materials*, 12(3), 177-191. <https://doi.org/10.1007/s10443-005-1122-6>
- [11] Mokhtari, M., Shahravi, M., & Zabihpoor, M. (2018). Development of dynamic behavior of the novel composite T-joints: Numerical and experimental. *Advances in aircraft and spacecraft science*, 5(3), 385-400. <https://doi.org/10.12989/aas.2018.5.3.385>
- [12] Mokhtari, M., Shahravi, M., & Zabihpoor, M. (2020). Novel development of dynamic behavior of carbon fiber reinforced polymer sandwich panels with stepwise graded adhesive layer. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 91(1), 50-59. <https://doi.org/10.1108/AEAT-08-2017-0179>
- [13] Goyal, V. K., Lundgren, E. C., & Patel, D. N. (2023). A study on the damage tolerance of durable redundant composite sandwich joints. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 25(1), 164-179. <https://doi.org/10.1177/10996362221130968>
- [14] Pelin, C-E., Axenie, A-R., Gaz, A., Pelin, G., Stefan, A., Moisei, C., & Arnau Cubillo, A. (2023). Design, manufacturing and testing of pull-out and shear-out insert allowable for sandwich applications. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 95(9), 1378-1391. <https://doi.org/10.1108/AEAT-10-2022-0280>
- [15] Al-Khazraji, M. S., Bakhy, S. H., & Jweeg, M. J. (2024). Composite sandwich structures: review of manufacturing techniques. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 22(5), 1616-1636. <https://doi.org/10.1108/JEDT-03-2022-0141>
- [16] American Society for Testing and Materials. (2022). *Standard Test Method for Water Absorption of Plastics* (ASTM D570-22). ASTM. <https://www.astm.org/d0570-22.html>
- [17] American Society for Testing and Materials. (2022). *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics* (ASTM D638-22). ASTM. <https://www.astm.org/d0638-14.html>