

Experimental Study of Preload and Bolt Arrangement on Composite Joint Performance in Megawatt Wind Turbine's Nacelle Cover and Nose Cone

A. Ghaznavi*, S. A. Moussavi

Department of Renewable Energy Research, Niroo Research Institute (NRI), Tehran, Iran

Review History:

Received: Jul. 05, 2022

Revised: May, 25, 2023

Accepted: Aug. 27, 2023

Available Online: Sep. 06, 2023

Keywords:

Composite joints

preload

bolt arrangement

wind turbine

nacelle cover

ABSTRACT: The nacelle cover and nose cones of most megawatt wind turbines are made of composite sheets. Due to the complex shapes, geometries, and large dimensions of these components, they are composed of several parts that must be assembled using non-permanent mechanical joints, such as bolts. Therefore, it is very important to consider all the effective parameters that affect composite joints. One of the most critical design parameters for bolt connections is the amount of bolt preload or tightening torque. However, increasing the preload without caution is not feasible due to the composite material present on both sides of the joint, as this can potentially damage the composite sheets. As a result, this paper aims to evaluate experimentally the effect of bolt preload or tightening torque on composite joints. To achieve this, identical specimens were fabricated, each with a different bolt tightening torque ranging from 2 Nm to 50 Nm. These specimens were then subjected to a tensile load. After determining the optimal preload force, four different types of arrangements were experimentally tested to find the best bolt arrangement. Finally, by examining various aspects, the best arrangement for connecting different parts of the nacelle cover and nose cone was determined.

1- Introduction

Composite joints play a vital role in the structural integrity of wind turbine components [1]. This experimental study aims to investigate the effect of preload and bolt arrangement on the performance of composite joints in the nacelle cover and nose cone of a Megawatt wind turbine. The study focuses on analyzing the mechanical behavior of composite joints under various loading conditions and bolt configurations. A series of experimental tests are conducted to evaluate the performance of the composite joints. These tests could include tensile, compressive, and fatigue loading scenarios, simulating the extreme operating conditions experienced by wind turbine components. The composite specimens are constructed using glass fiber-reinforced polymers, widely used in wind turbine applications for their high strength-to-weight ratio. Figure 1 shows the shell of the nacelle and the nose of the turbine. The connections between the parts have been determined based on the results of this article and the tests conducted. As can be observed, the dimensions of the shell are quite large due to the significant size of the equipment inside the megawatt wind turbine nacelle. It has a length, width, and height of 14 meters, 5 meters, and 4 meters respectively. Furthermore, the nose consists of four main parts, with the largest part being a circular shape measuring 4.5 meters in diameter.

The preload, the initial axial force on the bolt, is varied

to analyze its effect on the joint performance. Different bolt arrangements are also investigated. The experiments utilize a specialized testing rig capable of applying axial and shear loads on the composite joints, simulating realistic conditions.

Preliminary results indicate that the preload significantly affects the mechanical behavior of the composite joints. Higher preload values result in improved joint performance by minimizing the risk of bolt loosening and improving load transfer efficiency. Additionally, the bolt arrangement plays a crucial role in distributing loads across the joint interface and reducing stress concentrations.

The findings from this study will provide valuable insights into the optimization of composite joint design for wind turbine nacelle cover and nose cone applications. Understanding the influence of preload and bolt arrangement on joint performance will enable engineers to enhance the structural integrity and reliability of wind turbine components, contributing to the efficiency and durability of Megawatt wind turbines.

2- Investigation of the effect of pre-load on the behavior of composite connections

The geometry and testing method of the specimens were performed according to ASTM D 5961/D 5961 M standard [2]. The thickness of all specimens is within the standard

*Corresponding author's email: aghaznavi@nri.ac.ir



Fig. 1. Nasal Cover of the two-megawatt wind turbine is constructed using composite materials

range of 3 to 5 millimeters. The remaining dimensions of the specimens and the geometric parameters are defined according to the standard. These parameters include: $w/d = 4$, $e/d = 3$

To accurately determine the effect of preload on the behavior of the connection, only the preload parameter has been changed among all the constructed specimens, while the other material and geometry parameters remain constant so that the effect of preload on the breaking force of the connection can be studied independently. In these specimens, the tightening torques of the bolts that generate the preload forces of the connection are 2, 10, 20, 30, and 50 Newton meters. Five specimens have been tested for each torque to minimize testing and specimen fabrication errors and the ISO f7/H10 drilling standard has been used in the fabrication of all the specimens [3].

3- The effect of bolt arrangement on the behavior of composite connections

After determining the effective and optimal preload in composite joints, the goal is to determine the self-arrangement of the joint. Due to the large size of the components, using smaller bolts can increase the assembly, inspection, and repair time required for the parts, thereby increasing the cost of wind turbine construction, repair, and maintenance. On the other hand, increasing the bolt size can lead to a lack of joint integrity due to increased distance between the bolts. Therefore, accurate determination of the bolt size used is of great importance in joint design. For this reason, various joints with different arrangements have been evaluated in this section. To find the mentioned effect, the following 4 arrangements have been used: 5 M8 bolts, 4 M10 bolts, 3 M12 bolts, 2 M16 bolts.

4- Results and Discussion

Figure 2 represents the force-displacement diagram for all tested samples with tightening torques ranging from 2 to 50 Newton-meters. As shown in this figure, increasing the tightening torque and pre-load of the connection not only

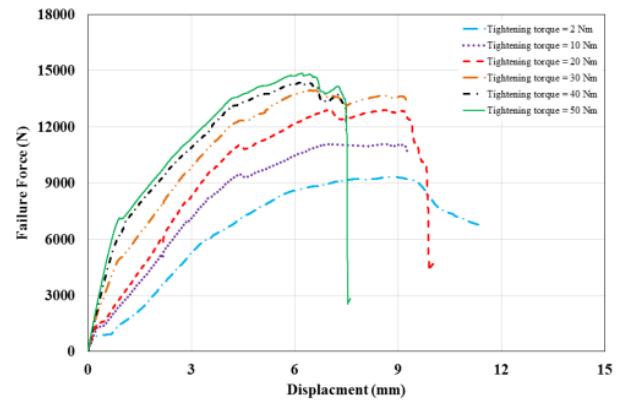


Fig. 2. Force-displacement diagram for different samples under tensile loading

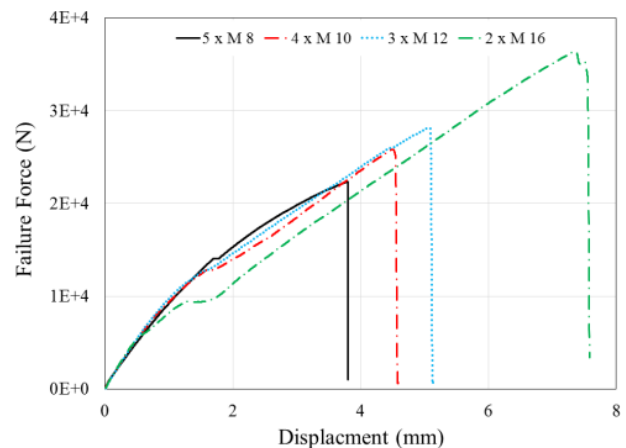


Fig. 3. Force-displacement diagram for different samples

increases the breaking force but also affects the slope of the force-displacement curve. The change in slope is due to the compression of both sides of the connection and changes in friction between the two connected parts. With an increase in pre-load, these breaks also occur at higher forces, indicating a better and stronger adhesion between the two sides of the connection. Another effect of increasing the pre-load or tightening torque is a decrease in the overall displacement of the connection at the point of failure. This, along with an increase in the reliability factor of the connection, leads to better integration of the components and improved performance of the structure formed by these different parts.

Figure 3 depicts the force-displacement graph for all tested configurations. As seen in the graphs, the configuration with two M16 bolts has the highest breaking force. The breaking force for this configuration is 63% higher than the breaking force for the connection with five M8 bolts. The displacement also increases as the breaking force in the connections increases. Another notable point is that at the beginning of



Fig. 4. State of bolted joint using five M8 bolts after the failure

the test, the slope of the force-displacement graph is the same for all cases. Then, as the force increases, this slope breaks and changes. This breaking point is when the tensile force in the connection exceeds the friction force and the two parts of the connection slide against each other.

Figure 4 shows the State of the bolted joint using five M8 bolts after the failure. As can be seen, the failure started from the first bolt. It began from the edges of the drilled hole and continued toward the edge of the component. Furthermore, this delamination occurs with extensive layering of the composite around the hole. It is also observed that the failure and delamination of the composite only occurred in one of the bolts, while the rest of the bolts are intact and in contact with the composite and the surrounding composites.

5- Conclusions

In summary, the following results can be stated:

- Increasing the torque applied to the bolts has a significant and noticeable effect on the break force of the connections. Increasing the torque from 2 to 50 Nm leads to a 55% increase in the break force of the connections.
- The breaking force of M16 connection is 67% higher than that of M8 connection. the resistance to slippage between components in M8 connection is 147% higher than in M16 connection. Resistance to slippage is important because after passing through this region, the bolt shaft comes into contact with the composite edge of the component, effectively loading the round edge hole in the composite piece, which can cause deformation.

References

- [1] S.A. Moussavi, A. Ghaznavi, Effect of boundary layer suction on performance of a 2 MW wind turbine, *Energy*, 232 (2021) 121072.
- [2] ASTM Standard D 5961/D 5961 M-96. Standard test method for bearing response of polymer matrix composite laminates; (2007).
- [3] ISO 286-1:2010 (en), Geometrical product specifications (GPS) - ISO code system for tolerances on linear sizes- Part 1: Basis of tolerances, deviations and fits, Chapter 6 (2010).

HOW TO CITE THIS ARTICLE

A. Ghaznavi, S. A. Moussavi, *Experimental Study of Preload and Bolt Arrangement on Composite Joint Performance in Megawatt Wind Turbine's Nacelle Cover and Nose Cone*, Amirkabir J. Mech Eng., 55(7) (2023) 175-178.

DOI: 10.22060/mej.2023.21559.7466





بررسی تجربی اثر پیش بار و چیدمان پیچ بر عملکرد اتصالات کامپوزیتی پوسته ناسل توربین بادی مگاواتی

آیدین غزنوی اسگوئی^{*}، سیدابوالفضل موسوی ترشیزی

پژوهشگاه نیرو، گروه انرژی‌های تجدیدپذیر، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۱۴

بازنگری: ۱۴۰۲/۰۳/۰۴

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۰۵

ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۶/۱۵

کلمات کلیدی:

کامپوزیت

اتصالات پیچی

پیش بار

چیدمان اتصال

توربین بادی

پوسته ناسل

خلاصه: پوسته ناسل و دماغه اغلب توربین‌های بادی مگاواتی از جنس ورق‌های کامپوزیتی می‌باشد. با توجه به شکل و هندسه‌های مختلف و همچنین ابعاد بزرگ این قطعه، امکان ساخت یکپارچه پوسته ناسل توربین بادی وجود ندارد. از اینرو، این قطعات از تکه‌های متعددی تشکیل شده است که بنا به نیاز مکرر توربین بادی به تعمیر و نگهداری در طول عمر بیست ساله خود، این قطعات باید توسط اتصالات غیر دائم مکانیکی همچون پیچ و مهره به یکدیگر متصل شوند. از اینرو با توجه به اهمیت موضوع، شناختن تمام پارامترهای اثر گذار و موثر بر اتصالات کامپوزیتی از اهمیت بسزایی برخوردار است. یکی از مهم‌ترین پارامترهای طراحی اتصالات پیچی، میزان پیش بار پیچ و انتخاب شماره پیچ می‌باشد. با توجه به جنس ورق‌های دو طرف اتصال در پوسته ناسل، امکان افزایش بی‌مهابای پیش بار وجود ندارد. چرا که خود این موضوع می‌تواند منجر به آسیب‌هایی به ورق‌های کامپوزیتی گردد. از اینرو در این مقاله، در ابتدا تاثیر پیش بار پیچ و یا گشتاور سفت کردن پیچ در اتصالات کامپوزیتی، به روش تجربی مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور نمونه‌های یکسانی با گشتاورهای سفت‌کنندگی پیچ ۲، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ نیوتن بر متر ساخته و تحت آزمون کشش قرار گرفته است. در ادامه، پس از تعیین بهینه‌ترین نیروی پیش بار، برای یافتن بهترین حالت چیدمان پیچ‌ها، ۴ نوع چیدمان مختلف نیز مورد آزمون تجربی قرار گرفت. و در نهایت با بررسی جوانب مختلف، بهترین چیدمان برای اتصال بخش‌های مختلف پوسته ناسل و دماغه در بارهای کششی که بار غالب در پوسته ناسل طراحی شده می‌باشد، تعیین گردید.

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر استفاده از منابع تجدیدپذیر به عنوان یکی از منابع اصلی تامین انرژی، گسترش روزافزون یافته است. انرژی بادی یکی از مهم‌ترین این منابع می‌باشد که در سال‌های اخیر با گسترش تکنولوژی و امکان ساخت توربین‌های بادی بزرگتر، بیش از پیش مورد توجه کشورهای پیشرفته و در حال توسعه قرار گرفته است [۱]. به نحوی که حداقل ۴۷ کشور در سراسر جهان اکنون بیش از ۵۰ درصد برق خود را از منابع تجدیدپذیر تأمین می‌کنند [۲، ۳].

یکی از اجزای مشترک در همه توربین‌های بادی، پوسته ناسل می‌باشد. پوسته ناسل، قطعه‌ای است کامپوزیتی که وظیفه محافظت از تجهیزات مکانیکی و الکترونیکی توربین بادی که در ارتفاع قرار دارند را دارد [۴]. با توجه به ابعاد بزرگ ناسل، به خصوص در توربین‌های مگاواتی، پوسته ناسل به ناچار از چندین قطعه کامپوزیتی تشکیل شده است. یکی از متداول‌ترین

و ایمن‌ترین روش‌های اتصال قطعات مختلف در کنار یکدیگر، اتصالات پیچی می‌باشد. طراحی اتصالات پیچ و مهره‌ای در سازه‌های کامپوزیتی به دلیل خواص مکانیکی ناهمسانگرد، حالت‌های شکست پیچیده و ناتوانی در تسلیم کامپوزیت‌ها بسیار پیچیده‌تر از سازه‌های فلزی است [۵]. در میان روش‌های مختلف اتصالات کامپوزیت‌ها، اتصالات چسبی معمولاً بازده ساختاری بالاتری را ارائه می‌دهند، اما دسترسی را محدود می‌کنند و می‌توانند هزینه‌های ساخت و نگهداری را افزایش دهند [۶]. بنابراین، بهینه‌سازی اتصالات پیچی کامپوزیت با استفاده از ابزارهای مختلف، همچنان در اولویت تولیدکنندگان قطعات کامپوزیتی قرار دارد [۷].

در طول سال‌های گذشته، محققین بسیاری درباره اتصالات کامپوزیت‌ها مطالعه کرده‌اند. این مطالعات به روش‌های مختلفی انجام شده و رویکردهای متفاوتی داشته‌اند. شیوه‌های فعلی طراحی اتصالات شامل رویکردهای مختلفی همچون، روش‌های تحلیل [۸-۱۱]، آزمون‌های تجربی [۱۲، ۱۳] و تحلیل‌های عددی سه بعدی [۱۴-۱۶] می‌باشند. در مدل‌های سه بعدی

^{*} نویسنده عهده‌دار مکاتبات: aghaznavi@nri.ac.ir



تطبیق دادند. در سال ۲۰۲۱ گرینه‌الگ و همکارانش [۲۴] به بررسی روش جدیدتری از اتصالات پرداختند که در آن از با استفاده از اتصالات جاذب انرژی شکست را از طریق فرآیند شکست یاتاقان افزایش می‌دهند. این روش پیشنهادی اتصالات در صنایع هوایی کاربرد داشته و بسیار متأثر از ضخامت ورق‌های کامپوزیتی و قطر پین استفاده شده در آن می‌باشد. همچنین وانگ و همکارانش [۲۵] در سال ۲۰۲۲ اتصالات کامپوزیتی را به روش تحلیل جدیدی بررسی کردند. در این روش آنها منطقه‌ای از مدل اصلی را که شامل پیچ و ناحیه پیرامونی است، با مجموعه‌ای از تیرهای چیده شده به صورت شعاعی جایگزین کردند. چو و همکارانش [۲۶] نیز به بررسی اثرات تخریب ناشی از سوراخ کاری اتصالات کامپوزیتی پرداختند. آنها این بررسی را با استفاده از تکنیک‌های فوتوگرافی انجام دادند و رویکرد اصلی‌شان کامپوزیت‌های مورد استفاده در صنایع هوایی بود. در نهایت هدف آنها بهبود عملکرد اتصالات کامپوزتی و بررسی حد دوام کامپوزیت‌ها با لایه‌های آسیب دیده در حین پروسه سوراخ کاری بود. همچنین واندرکلاک و همکارانش [۲۷] نیز با روش المان محدود سه بعدی به بررسی تخریب اتصالات کامپوزیتی پرداختند. آنها برای استفاده از روش المان محدود با استفاده از برنامه نویسی در نرم افزار آباکوس آسیب پیش رونده را شبیه‌سازی کردند. آنها در مدلشان چندین آسیب مهم همچون جهت‌گیری ترک ماتریس، اثر بسته شدن ترک ماتریس، و پاسخ‌های فشاری طولی مواد شکست خورده تحت محدودیت‌های عرضی در منطقه خرد شدن را با استفاده از معیار هاشین برای شکستگی فیبر و معیار موهر-کولن برای پیش‌بینی ترک خوردگی ماتریس در نظر گرفتند. در نهایت مطالعه آنها نشان داد که ترک خوردگی ماتریس، آسیب رایج‌تر و غالب‌تری نسبت به شکستگی الیاف است که در نهایت منجر به آسیب نهایی قطعه کامپوزیتی می‌شود. چو و همکارانش به بررسی اثر نیروی بستن اتصالات بر نیروی شکست اتصالات کامپوزیتی پرداختند. آنها از روش المان محدود سه بعدی برای این ارزیابی استفاده کردند. غزنوی و همکارانش [۲۸] نیز به بررسی اتصال چسبی پل‌های تقویتی پوسته ناسل توربین بادی پرداختند و با استفاده از روش المان محدود سه بعدی، مودهای شکست و نیروهای شکست این اتصالات را بدست آوردند.

در این مقاله، اتصال مکانیکی بین قطعات مختلف پوسته ناسل به روش تجربی بررسی شده است. در ابتدا هدف بدست آوردن میزان موثر پیش بار بر اتصال است. از این‌رو در این مرحله اتصال بین قطعات، به صورت تک پیچ فرض شده است. از آنجایی که در طراحی اولیه اتصالات، فرض شده است که قطعات با پیچ‌های M10 به یکدیگر متصل شده‌اند، آزمون‌ها با پیچ

المان محدود، هر قسمت از اتصال، به صورت جداگانه شبیه‌سازی شده و سپس با استفاده از المان‌های تماسی این اجزا در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. در این مدل‌ها اثرات پارامترهای مختلفی همچون فاصله، اصطکاک بین اجزا، توزیع بار در اتصالات چند پیچ بررسی شده است. ویژگی مهم این روش‌ها، داشتن جزییات مناسب و بررسی دقیق پارامترهای مختلف می‌باشند اما ایراد اساسی آنها، زمان بر بودن زیاد محاسبات به خصوص برای مدل‌هایی که اصطکاک و یا آسیب در آنها شبیه‌سازی می‌شوند. ایخ و شون [۱۷، ۱۸] یک مدل المان محدود یک بعدی متشکل از عناصر ساختاری با امکان شبیه‌سازی اثرات بستن پیچ، فاصله و اصطکاک ایجاد کردند. چندین مدل FE دو بعدی نیز برای مطالعه رفتار مشترک توسعه داده شده است. در این آثار، پین‌ها به طور کلی به عنوان سطوح صلب مدل می‌شوند، در حالی که صفحات به عنوان عناصر پوسته [۱۹] یا پوسته‌های پیوسته [۲۰] نشان داده می‌شوند. علیرغم اینکه این رویکردها برای طراحی اتصال سریع و مفید هستند، مطالعه عمیق تعامل پیچیده بین پیچ‌ها و صفحات را امکان‌پذیر نمی‌سازد چرا که در آنها، بعد ضخامت اتصال نشان داده نمی‌شود.

تلاش‌های زیادی برای بررسی عددی و تجربی تأثیر ویژگی‌ها و پارامترهای هندسی بر رفتار و استحکام اتصال صورت گرفته است. پیرز و همکاران [۲۱] بررسی‌های گسترده‌ای را در مورد اثر پاکسازی روی پاسخ مکانیکی اتصال انجام داد. آنها ابتدا این پدیده را به صورت تجربی با استفاده از اتصالات تک لبه با پیچ‌های بیرون زده تک انگشتی مورد مطالعه قرار دادند و تاخیر در برداشتن بار متناسب با میزان فاصله بین پیچ‌ها و سوراخ‌ها را نشان دادند. پس از این، آنها قصد داشتند رفتار مشاهده شده را با یک مدل FE سه بعدی با همان پیکربندی مشترک و بدون پیش بارگذاری در پیچ‌ها تکرار کنند. این مدل توانست اثری که در آزمایش مشاهده شده بود را با دقت خوبی بازتولید کند. بنابراین آنها مدل را برای مطالعه اثر فاصله در اتصالات پیچی چند ردیفه گسترش دادند. حسن و همکارانش [۲۲] نیز با استفاده از روش المان محدود به بررسی اتصالات کامپوزیتی با پیچ‌هایی از جنس تیتانیوم که به روش رو برو بسته شده باشند، پرداختند. هرچند مدل آنها از دقت قابل قبولی برخوردار بود، اما با توجه به عدم شبیه‌سازی آسیب در کامپوزیت، ضعف‌هایی نیز داشت. همچنین بلاری و همکارانش [۲۳] با استفاده از مدل‌های المان محدود به بررسی شکست اتصالات کامپوزیت با مد بیرون کشیدگی پیچ پرداختند. آنها از رویکرد مدل‌سازی پوسته انباشته برای مدل‌سازی مؤثر برهم‌کنش لایه‌برداری و شکست لایه در حالت بار دینامیکی پیچیده استفاده کردند و نتایج بدست آمده خود را با نتایج آزمون‌های تجربی



شکل ۱. الف) پوسته ناسل، ب) دماغه توربین بادی دو مگاواتی ساخته شده از قطعات کامپوزیتی

Fig. 1. a) Nasal Cover, b) The nose cone of the two-megawatt wind turbine is constructed using composite materials

و همچنین چیدمان مطمئن پیچ‌ها، این اتصالات در طرح نهایی ساخت پوسته ناسل و دماغه توربین بادی دو مگاواتی ملی به کار گرفته شد. شکل ۱ نشان دهنده پوسته ناسل و دماغه این توربین می‌باشد، که در نهایت اتصالات بین قطعات آن، بر مبنای نتایج این مقاله و آزمون‌های انجام شده تعیین گردیده است. همانطور که مشاهده می‌شود، ابعاد این پوسته بدلیل سایز بزرگ تجهیزات داخل ناسل توربین بادی مگاواتی، بسیار بزرگ بوده و دارای طول، عرض و ارتفاعی برابر ۱۴ متر، ۵ متر و ۴ متر می‌باشد. همچنین دماغه نیز از چهار بخش کلی تشکیل شده است که قطر بزرگ‌ترین قسمت آن دایره‌ای به قطر ۴٫۵ متر می‌باشد. دلیل تعدد قطعات دماغه، علاوه بر کاهش هزینه تولید، سهولت نصب بر روی هاب می‌باشد. با این نحوه انتخاب دماغه، حتی بعد از نصب پره‌های توربین بادی می‌توان قطعات کامپوزیتی دماغه را نصب کرد که این موضوع منجر به سرعت نصب توربین بادی و در نتیجه کاهش هزینه‌های نصب توربین بادی می‌گردد. همانطور که مشاهده می‌شود، با توجه به تعداد اتصالات فراوان قطعات کامپوزیتی توربین بادی، بدست آوردن اتصالات بهینه از جمله سایز پیچ مناسب و فاصله اتصال که هدف نهایی را برآورده کند، از اهمیت بالایی برخوردار است. از اینرو هدف نهایی این پژوهش، یافتن این موضوع است که کدام چیدمان نتیجه بهتری در بر دارد. همچنین شایان ذکر است با توجه به صنعتی و در حال ساخت بودن پروژه، دستاوردهای پژوهشی بدست آمده در این مقاله، عینا در پروژه صنعتی مرتبط

M10، طراحی و ساخته شده‌اند. شایان ذکر است که لایه چینی نمونه‌های آزمون، دقیقاً مشابه با لایه چینی موجود در پوسته ناسل و دماغه توربین بادی می‌باشد. پس از بدست آوردن مقدار مناسب پیش بار در اتصالات کامپوزیتی، به بررسی چیدمان پیچ‌ها پرداخته شده است. منظور از چیدمان پیچ‌ها سایز انتخابی و تعداد پیچ‌ها در یک فاصله یکسان است. برای این منظور مدل‌های تجربی متعددی برای آزمایش ساخته شده است که در این مدل‌ها، چیدمان‌های مختلفی برای اتصال دو قطعه کامپوزیتی در نظر گرفته شده است. در این چیدمان‌ها، در طول ثابتی، شماره پیچ‌ها از سایز ۸ تا سایز ۱۶ تغییر کرده است. برای مقایسه بهتر طول اتصال، ثابت در نظر گرفته شده است و از اینرو، در یک طول ثابت تعداد پیچ‌ها متغیر در نظر گرفته شده است. در نهایت هدف از انجام سری دوم آزمون‌ها، یافتن این موضوع است که برای اتصال دو قطعه بزرگ کامپوزیتی پوسته ناسل، چه چیدمان پیچی حالت بهینه و مستحکم تر را ایجاد می‌کند. با توجه به بزرگ بودن قطعات کامپوزیتی پوسته ناسل، می‌توان برای اتصال دو قطعه، از پیچ‌های سایز کوچک‌تر و با تعداد بیشتر استفاده کرد؛ و یا اینکه از پیچ‌های سایز بزرگ‌تر و با تعداد کمتر بهره جست. گفتنی است در مرحله بررسی چیدمان پیچ‌ها، همه اتصالات با پیش بار بهینه بدست آمده در آزمون‌های مرحله اول، ساخته شده‌اند. به تعبیر دیگری، آزمون‌های سری اول پیش نیاز مجموعه آزمون‌های سری دوم می‌باشند. در نهایت بعد از بدست آمدن پیش بار بهینه

به کار گرفته شده است. از جمله مزایای این مقاله، بررسی چندین رفتار چندین اتصال ممکن برای استفاده در پوسته ناسل می‌باشد تا در نهایت اتصالی که عملکرد مناسب‌تری از نقطه نظر استحکام و سایر موارد نصب و نگهداری توربین بادی دارد، مورد استفاده قرار گیرد. به طور خلاصه می‌توان گفت که برای بررسی اثر پیش بار ۵ سری آزمون با گشتاورهای سفت کردن ۲، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ نیوتن متر مورد بررسی قرار گرفتند که در نهایت نتایج بدست آمده نشان داد که افزایش گشتاور سفت کردن پیچ، تاثیر بسزا و چشمگیری در نیروی شکست اتصال دارد. به نحوی که افزایش گشتاور از ۲ به ۵۰ نیوتن متر، باعث افزایش ۵۵ درصدی نیروی شکست اتصال می‌گردد. همچنین برای بررسی اثر چیدمان‌های مختلف پیچ‌ها بر نیروی شکست اتصال، چهار حالت چیدمان مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است که در نهایت اتصال با پیچ M16 از نیروی شکست بالاتری برخوردار بود. اما در نهایت با بررسی تمام جوانب و نقاط مثبت و منفی هر کدام از چیدمان‌ها، استفاده از چیدمان پیچ‌های M12 با نیروی پیش کشش ۷۵ کیلونیوتن بهترین حالت برای قطعات کامپوزیتی پوسته ناسل و دماغه می‌باشد.

۲- نمونه‌های ساخته شده آزمون تجربی

تمام نمونه‌های ساخته شده از جنس الیاف شیشه و رزین پلی استر می‌باشد که لایه چینی آنها عبارت است از: $[M/W_2]_s$ که در اصل همان لایه چینی به کار رفته در ساخت بخش‌های کامپوزیتی پوسته ناسل توربین بادی دو مگاواتی می‌باشد. در ساخت نمونه‌ها، از پارچه‌های شیشه سوزنی^۱ ۴۵۰ گرمی و از پارچه‌های بافته شده ۶۰۰ گرمی استفاده شده است. که در مجموع برای ساخت نمونه‌های اتصال از ۴ لایه ۶۰۰ گرمی بافته شده که در جهت‌های ۰ و ۹۰ درجه قرار گرفته‌اند و یک لایه سوزنی در بالا و پایین قطعه استفاده شده است. شایان ذکر است که تمامی نمونه‌ها با روش لایه چینی دستی ساخته شده‌اند. روش کار به این نحوه بوده است که بعد از بریدن الیاف ابتدا سطح مورد نظر که قرار است الیاف بر روی آن قرار گیرد را با واکس جدا کننده پوشش داده شده تا پس از ساخت نمونه‌ها بتوان به راحتی نمونه را از آن سطح جدا نمود. پس از زدن واکس بر روی سطح، پارچه داکرون بر روی آن سطح گذاشته می‌شود. این پارچه سطح یکنواخت و زبری را ایجاد می‌کند که در انتها نیز از نمونه جدا می‌شود. پس از آماده کردن رزین و اضافه کردن هاردنر به آن، با استفاده از قلم مو رزین تهیه شده به پارچه داکرون زده می‌شود تا در انتها سطح زیرین نمونه نیز با رزین آغشته شود. بعد

از پوشش دادن یکنواخت پارچه داکرون با رزین یک لایه از الیاف شیشه مورد نظر بر روی آن قرار می‌گیرد. سپس با استفاده از قلم مو الیاف به رزین آغشته می‌شود. پس از آغشته‌سازی لایه اول از رزین لایه‌های دیگر نیز بر روی لایه اول قرار گرفته و با رزین اشباع می‌شود. با اتمام تمامی لایه‌ها و قرار گرفتن آن‌ها بر روی هم، روی آن‌ها یک پارچه داکرون قرار می‌گیرد. برای بهبود کیفیت نمونه‌ها و خارج کردن رزین اضافی از آن، پس از قرار گرفتن پارچه داکرون بالایی، از یک پارچه نمدی نیز استفاده می‌شود که بر روی تمامی لایه‌ها قرار می‌گیرد. این پارچه نمدی تا حدودی می‌تواند رزین اضافی را به خود جذب کند بعد از ۵۰ دقیقه رزین سفت شده و بعد از حدود ۱۰ ساعت پارچه‌های داکرون از نمونه جدا می‌شود. این نوع رزین مورد استفاده شده در دمای محیط سفت شده و نیاز به اتوکلاو برای بالابردن حرارت قطعه ندارد. به دلیل ایجاد شرایط مشابه تست با شرایط ساخت نمونه واقعی پوسته ناسل توربین بادی، از گذاشتن وزنه بر روی نمونه‌ها بعد از اتمام کار خودداری شد. هرچند شایان ذکر است که مشابه با شرایط ساخت نمونه به دفعات غلتک زده شده تا رزین اضافی از پارچه‌ها خارج گردند. همچنین گفتنی است نمونه‌ها در دمای محیط ۲۱ درجه سانتی گراد ساخته شده‌اند که در محدوده دمایی پیشنهادی شرکت سازنده رزین (محدوده بین ۱۸ تا ۲۵ درجه سانتیگراد) می‌باشد. سخت کننده مورد استفاده برای این رزین، مدلی از نوروکس^۲ می‌باشد که به میزان ۲ درصد وزن رزین به آن اضافه شده است. برای بدست آوردن خواص مکانیکی نمونه‌ها آزمون‌هایی طبق استاندارد شماره D3039 متعلق به انجمن آزمایش و مواد آمریکا^۳ انجام شده است. این آزمون‌ها برای هر دو پارچه شیشه سوزنی ۴۵۰ گرمی و پارچه بافته شده ۶۰۰ گرمی انجام شده است. در نهایت نتایج آزمون کشش این دو نمونه در جدول ۱ خلاصه شده است. برای ساخت این نمونه‌ها مطابق با استاندارد مذکور، از پنج لایه پارچه مورد نظر استفاده شده است.

همچنین رزین استفاده شده، کریستومر^۴ محصول شرکت اسکات بدر^۵ می‌باشد که یک رزین بر پایه اورتان اکریل غیر اشباع در منومر استایرن است. این رزین برای استفاده در محصولات ساخته شده از پلی‌استر تقویت شده با الیاف بسیار مناسب بوده و چسبندگی عالی با لمینیت، هسته و فلز را ایجاد می‌نماید. همچنین خواص مکانیکی این چسب در محدوده دمایی کاری، افت نسبتاً کمی داشته و از اینرو کامپوزیت ساخته شده برای پوسته

- 2 Norox KP9
- 3 ASTM
- 4 Crestomer1152PA
- 5 Scott Bader

جدول ۱. خواص مکانیکی نمونه‌های کامپوزیتی ساخته شده از الیاف حصیری و بافته شده

Table 1. Mechanical properties of composite samples made of mat and woven fibers

نوع ماده	مدول (گیگا پاسکال)	مقاومت (مگا پاسکال)
الیاف سوزنی / پلی استر	۱۰/۸۵	۱۴۱/۷
الیاف حصیری / پلی استر	۲۰/۴	۲۵۰/۲

جدول ۲. خواص مکانیکی رزین استفاده شده در ساخت نمونه‌ها

Table 2. Mechanical properties of the resin used in making the samples

خاصیت	-۱۰ ° C	۰	۲۰ ° C	۵۰ ° C
مقاومت کششی (مگا پاسکال)	۴۰	۳۵	۲۵	۲۵
درصد ازدیاد طول کششی (%)	۳/۵	۵۰	۱۰۰	۱۴۰

جدول ۳. تolerانس سوراخ کاری نمونه‌های آزمون تجربی بر اساس استاندارد ISO, f7/H10 [۲۹]

Table 3. Drilling tolerance of experimental test samples based on ISO standard f7/H10 [29]

قطر اسمی سوراخ (mm)	لقی بین پیچ و سوراخ		پیچ		سوراخ	
	$\lambda \max (\mu m)$	$\lambda \min (\mu m)$	$d \max (\mu m)$	$d \min (\mu m)$	$d \max (\mu m)$	$d \min (\mu m)$
۶-۳	۷۰ (۲/۳٪ از ۳ میلیمتر)	۱۰	-۲۲	-۱۰	۰	+۴۸
۱۰-۶	۸۶ (۱/۴٪ از ۶ میلیمتر)	۱۳	-۲۸	-۱۳	۰	+۵۸
۲۴-۱۸	۱۲۵ (۰/۷٪ از ۱۸ میلیمتر)	۲۰	-۴۱	-۲۰	۰	+۸۴

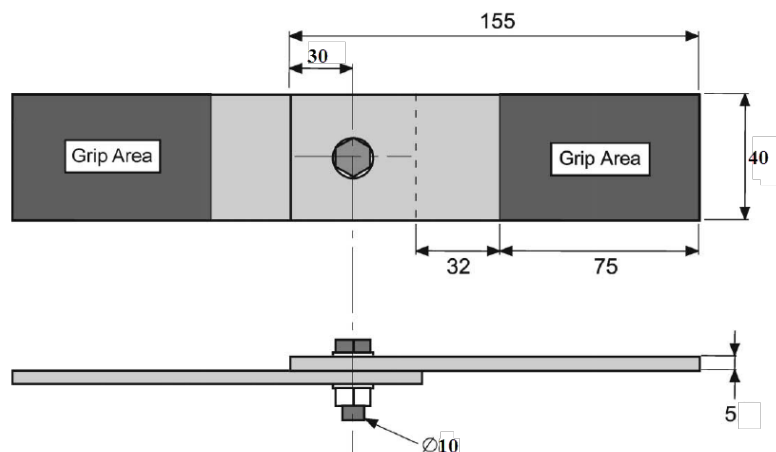
می‌باشد. سوراخ کاری نمونه‌ها به نحوی انجام شده است که قطر سوراخ از جدول ۳ تبعیت می‌کند و از اینرو فاصله موجود بین ساق پیچ و لبه سوراخ در کامپوزیت طبق استاندارد مطرح شده می‌باشد.

۲-۱- بررسی اثر پیش بار پیچ بر رفتار اتصالات کامپوزیتی

هندسه نمونه‌های ساخته شده برای بررسی اثر میزان پیش بار بر رفتار اتصال، در شکل ۲ نشان داده شده است. هندسه نمونه‌ها و همچنین روش آزمون بر اساس استاندارد D 5961/D 5961 M متعلق به انجمن

ناسل از استحکام لازم برخوردار خواهد بود. خواص مکانیکی رزین نیز در جدول ۲ نشان داده شده است.

گفتنی است که برای سوراخ کاری و تهیه پیچ‌ها در اتصالات مکانیکی تمام نمونه‌ها از استاندارد ایزو^۱ شماره f7/H10 استفاده شده است و سوراخ‌ها در محدوده مجاز معرفی شده توسط استاندارد انجام شده است. اندازه‌های مجاز این استاندارد بر اساس قطر سوراخ‌های مختلف در جدول شماره ۳ ارائه شده است، که در آن d اندازه اسمی سوراخ و λ ، تolerانس مورد قبول استاندارد



شکل ۲. ابعاد هندسی نمونه‌های ساخته شده برای آزمون

Fig. 2. Geometrical dimensions of samples for experimental tests

لازم به یادآوری است که در تمام محاسبات، مطابق با استاندارد یاد شده، ضریب اصطکاک ۰/۱۴ در نظر گرفته شده است. از اینرو برای بررسی این پارامتر در این اتصال، گشتاور سفت کردن پیچ از ۲ نیوتن بر متر که عملاً در آن‌ها پیچ فقط بر روی اتصال بسته شده است شروع شده و تا مقدار گشتاور ۵۰ نیوتن بر متر که بیشترین گشتاور پیشنهادی استاندارد می‌باشد، افزایش یافته و نیروی شکست و مودهای شکست در این محدوده ارزیابی شده اند. شایان ذکر است که با گشتاور ۲ نیوتن متر عملاً پیچ‌ها فقط بسته شده‌اند و هیچ پیش باری روی پیچ ایجاد نشده است و لذا صفحات دو طرف اتصال به هیچ وجه روی یکدیگر فشرده نمی‌شوند.

۲-۲- بررسی اثر چیدمان پیچ بر رفتار اتصالات کامپوزیتی

علاوه بر تعیین پیش بار، موضوع مهم دیگری که در طراحی اتصال‌های قطعات کامپوزیتی از جمله قطعات پوسته ناسل و دماغه توربین بادی بسیار حایز اهمیت است، چیدمان اتصال می‌باشد. از این‌رو پس از تعیین مقدار پیش بار موثر و بهینه در اتصالات کامپوزیتی پوسته ناسل، هدف تعیین خود چیدمان اتصال است. به عبارت دیگر هدف از این بخش، پاسخ به این سوال است که عملاً از چه شماره پیچی و با چه تعدادی برای اتصال دو قطعه استفاده شود تا عملکرد نهایی اتصال بهتر باشد. با توجه به بزرگ بودن قطعات، استفاده از پیچ‌های شماره پایین، می‌تواند منجر به افزایش زمان مورد نیاز برای مونتاژ و بازدید و تعمیر قطعات و در نتیجه افزایش هزینه ساخت و تعمیر و نگهداری توربین بادی گردد، از طرفی، افزایش

آزمایش و مواد آمریکا^۱ انجام شده است [۳۰]. ضخامت همه نمونه در محدوده استاندارد که عددی بین ۳ تا ۵ میلیمتر می‌باشد، قرار دارد. باقی ابعاد نمونه و پارامترهای هندسی مطرح نیز مطابق با استاندارد تعریف شده است. این پارامترها عبارتند از: $e/d = 3$ و $w/d = 4$. به دلیل تشخیص دقیق اثر پیش بار در رفتار اتصال، در بین همه نمونه‌های ساخته شده تنها پارامتر پیش بار تغییر کرده است و سایر پارامترهای مواد و هندسه ثابت مانده است تا در نهایت بتوان اثر پیش بار بر نیروی شکست اتصال را به تنهایی بررسی کرد. در این نمونه‌ها گشتاورهای سفت کردن پیچ‌ها که نیروهای پیش بار اتصال را ایجاد می‌کنند عبارتند از: ۲، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۵۰ نیوتن در متر. در هر کدام از گشتاورها، پنج نمونه آزمایش شده است تا حداقل امکان از خطاهای آزمایش و ساخت نمونه‌ها جلوگیری شود. از این‌رو در مجموع برای یافتن تاثیر این پارامتر ۲۵ عدد آزمایش انجام شده است. سایز پیچ‌ها (d) در بین تمام نمونه‌ها ثابت و از پیچ M10 و با درجه ۸/۸ که مورد استفاده در اتصال قطعات کامپوزیتی می‌باشد، استفاده شده است. همانگونه که ذکر شد، در ساخت همه نمونه‌ها نیز از استاندارد سوراخ‌کاری ایزو f7/H10 استفاده شده است.

یکی از مهم‌ترین پارامترهای تصمیم‌گیری در این تحقیق، تعیین مقدار گشتاور بستن پیچ می‌باشد. مطابق استاندارد VDI2230 که برای طراحی اتصالات پیچی است. بیشترین گشتاور سفت کردن پیچ برای پیچ‌های M10 و با ضریب اصطکاک ۰/۱۴، برابر ۵۴ نیوتن متر می‌باشد. همچنین

جدول ۴. ابعاد نمونه‌های آزمون کشش اتصال

Table 4. Samples dimension of bolted joint tensile test

عرض نمونه (میلیمتر)	
۳۲	۵ پیچ M8
۴۰	۴ پیچ M10
۴۸	۳ پیچ M12
۶۴	۲ پیچ M16

نیز از استاندارد شماره f7/H10 متعلق به موسسه ایزو پیروی می‌کنند. اندازه‌های این استاندارد در جدول شماره ۳ ارائه شده است. که در آن d ، اندازه سوراخ و λ ، تیرانس مورد قبول استاندارد می‌باشد. نمونه‌های ساخته شده از چیدمان‌های مختلف در شکل ۳ نشان داده شده است.

۳- نتایج و بحث

در این قسمت به بررسی نتایج بدست آمده از هر دو مجموعه آزمون‌های تجربی یاد شده هر در بخش قبلی پرداخته می‌شود. در ابتدا نتایج مربوط برای محاسبه پیش بار ارائه شده و در ادامه نتایج بدست آمده برای چیدمان پیچ‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرند. شایان ذکر است که نتایج محاسبات پیش بار بهینه برای اتصالات کامپوزیتی پوسته ناسل و دماغه توربین بادی، در آزمون‌های سری بعدی که همان چیدمان‌های مختلف اتصالات می‌باشد، استفاده شده است. همچنین نتایج از هر دو جنبه نیروی شکست اتصال و مود شکست مورد بررسی قرار گرفته است.

۳-۱- ارزیابی پیش بار پیچ در اتصالات کامپوزیتی

همانطور که عنوان شد، یکی از مهم‌ترین پارامترهای موثر بر کارایی و مقاومت اتصال، نیروی پیش بار برای سفت کردن پیچ‌های به کار رفته در اتصال می‌باشد. از این رو در این بخش، یک اتصال ثابت با نیروهای پیش بار متفاوت آزمون شده و نتایج آن تحت آزمون کشش مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای بررسی دقیق‌تر اثر پیش بار بر رفتار اتصال، این موضوع در دو حوزه مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا تاثیر پیش بار بر نیروی شکست اتصال ارزیابی شده است و در ادامه، اثر پیش بار بر روی مود شکست اتصال مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته است.

شماره پیچ نیز به دلیل افزایش فاصله پیچ‌ها از یکدیگر می‌تواند منجر به عدم یکپارچگی اتصال شود. از اینرو تعیین دقیق شماره پیچ استفاده شده، در طراحی اتصال از اهمیت بسزایی برخوردار است. به همین دلیل در این بخش اتصالات مختلف با چیدمان‌های متفاوت مورد ارزیابی قرار گرفته است. پیش بار اتصالات، از نتایج آزمون تجربی بخش قبلی بدست آمده است. از اینرو همه چیدمان‌های اتصال، با بهینه ترین پیش بار، انجام شده است. لذا می‌توان مطمئن بود که در این مجموعه از آزمون‌ها فقط خود چیدمان‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. هندسه نمونه‌ها و همچنین روش آزمون بر اساس استاندارد شماره D5961/D 5961M متعلق به انجمن آزمایش و مواد آمریکا انجام شده است. ضخامت این نمونه‌ها نیز در محدوده استاندارد که عددی بین ۳ تا ۵ میلیمتر می‌باشد، قرار دارد. باقی ابعاد نیز و پارامترهای هندسی نیز مطابق با استاندارد تعریف شده است. این پارامترها عبارتند از: $w/d = 4$, $e/d = 3$. برای یافتن اثر ذکر شده، از ۴ چیدمان زیر استفاده شده است:

➤ ۵ پیچ M8

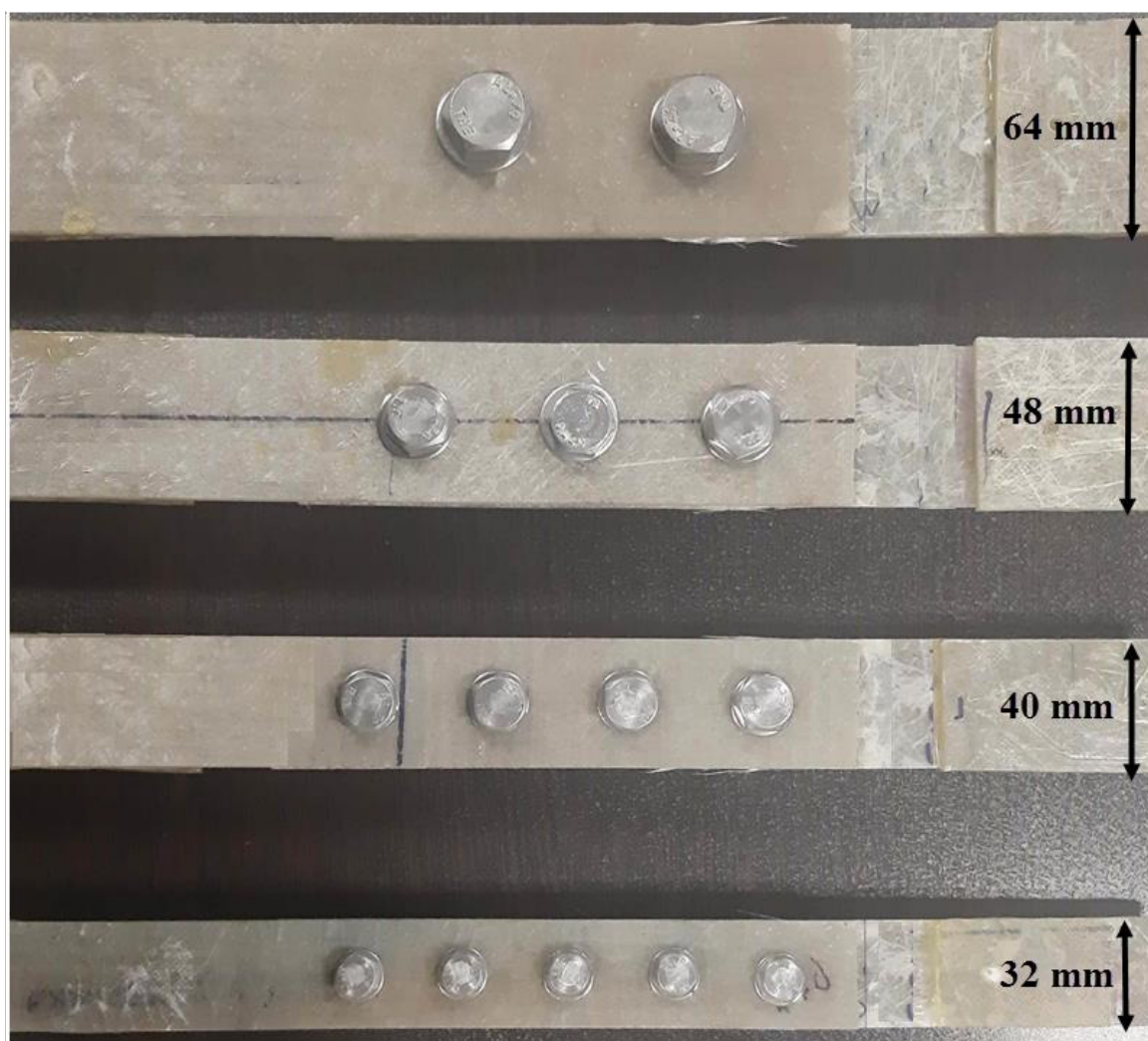
➤ ۴ پیچ M10

➤ ۳ پیچ M12

➤ ۲ پیچ M16

اندازه نمونه‌ها به نحوی انتخاب شده است که در اتصال با پیچ بزرگ‌تر M16 نیز، اتصال به صورت تک پیچ نباشد و همه اتصالات حالت چند پیچ را داشته باشند تا شرایط همه نمونه‌ها یکسان باشد. عرض نمونه‌های آزمون در جدول ۴ نشان داده است.

شایان ذکر است که از هر سری، ۵ نمونه برای آزمون آزمایش شده تا از خطاهای احتمالی نمونه سازی و آزمون تا حد ممکن کاسته شود. در این سری از آزمون‌ها نیز همچون حالت قبل، استاندارد سوراخ کاری و پیچ‌ها



شکل ۳. چهار چیدمان آزمون شده به روش تجربی

Fig. 3. Four layouts tested experimentally

انحراف معیار ۲ قرار داشته باشند. همچنین آزمونی از اعتبار برخوردار است که ۹۵ درصد نتایج بدست آمده آن در این محدوده انحراف معیار قرار گیرند. همانطور که مشاهده می‌شود، انحراف معیار برای تمامی سری‌های آزمون در محدوده مجاز قرار دارد. از اینرو تمام نتایج بدست آمده از اعتبار لازم برخوردارند.

همانطور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، با افزایش گشتاور سفت کردن پیچ، نیروی شکست افزایش می‌یابد. این موضوع به خاطر افزایش نیروی اصطکاک بین دو طرف اتصال است که بدلیل افزایش میزان پیش بار پیچ، رخ می‌دهد. همانطور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، افزایش گشتاور بستن

۳-۱-۱- ارزیابی نیروی شکست نمونه‌های آزمون پیش بار

پس از انجام آزمون‌ها نتایج بدست آمده برای نمونه‌های مختلف پیچ M10 در جدول ۵ نشان داده شده است. همچنین انحراف معیار آزمون نیز در جدول ۵ برای هر سری از نمونه‌ها نشان داده شده است. گفتنی است که برای هر سری آزمون، ۵ نمونه ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفته است که انحراف معیار بین نتایج این نمونه‌ها محاسبه شده است. انحراف معیار بدست آمده حکایت از اعتبار همه نتایج آزمون‌ها و مورد قبول بودن نتایج بدست آمده دارد. مطابق با استاندارد D5961/D 5961M متعلق به انجمن آزمایش و مواد آمریکا نتایجی مورد قبول می‌باشند که در محدوده

جدول ۵. نیروی شکست برای نمونه‌های مختلف، بدست آمده از آزمون تجربی

Table 5. The failure force for different samples obtained from the experimental test

نمونه	گشتاور بستن پیچ (Nm)	نیروی شکست (kN)	انحراف معیار
۱	۲	۹/۳۱	۰/۲۳
۲	۱۰	۱۱/۰۴	۰/۳۸
۳	۲۰	۱۲/۷۴	۰/۵۶
۴	۳۰	۱۴/۰۹	۰/۳۴
۵	۴۰	۱۴/۴۱	۰/۳۲
۶	۵۰	۱۴/۶۹	۰/۴۰

در حالت کلی، با مشاهده نمودار نیرو جابجایی اتصالات (شکل ۵) می‌توان ۵ ناحیه یکسان را در تمام نمونه‌های آزمون شده تعیین کرد. این نواحی عبارتند از:

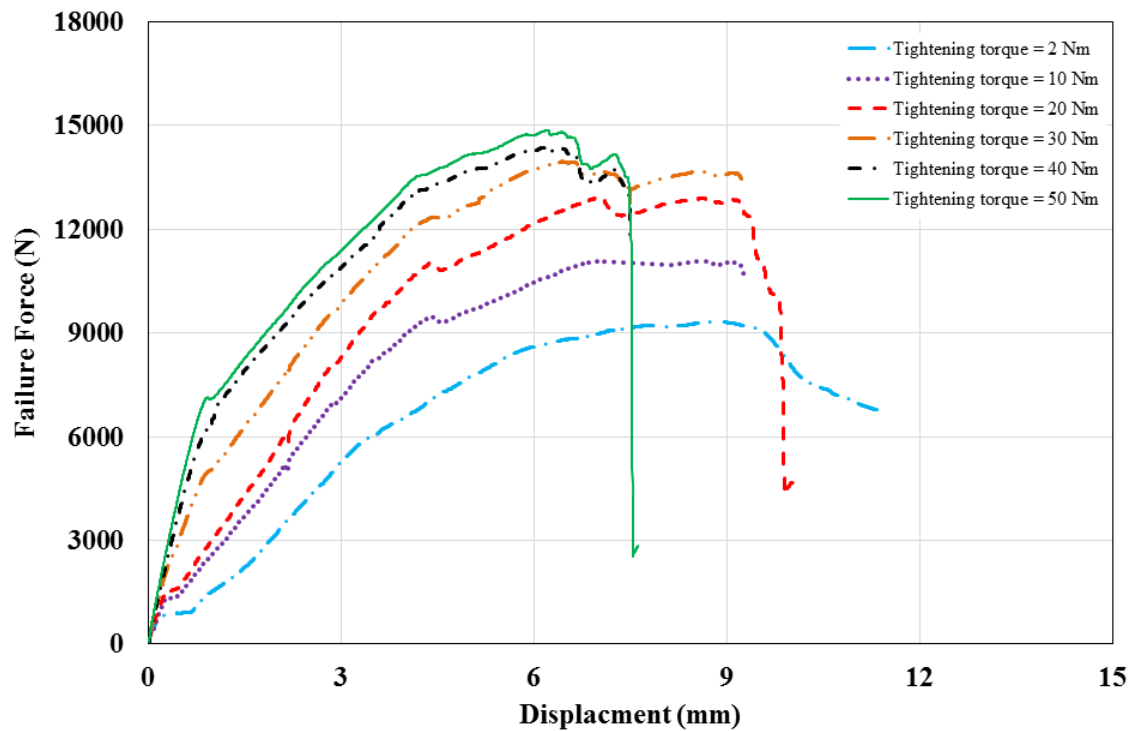
۱. ناحیه بدون لغزش
۲. ناحیه لغزش
۳. ناحیه تماس کامل
۴. آسیب
۵. شکست نهایی

این نواحی به طور شماتیک در شکل ۵ نشان داده شده‌اند. هرچند این نواحی در نمونه‌های مختلف دارای مقادیر متفاوتی می‌باشند اما در تمام نمونه‌ها و آزمون‌ها، می‌توان این ۵ ناحیه را تشخیص داده و به خوبی از یکدیگر تفکیک کرد. در ناحیه اول، که ناحیه بدون لغزش می‌باشد، اتصال دارای بیشترین صلبیت خود است. در این بخش، صفحات اتصال هیچ حرکتی نسبت به یکدیگر ندارند، و از این‌رو، تمام نیروی وارد به اتصال از طریق اصطکاک بین صفحات تحمل می‌شود. بیشترین نیروی اتصال در این مرحله ارتباط کاملاً مستقیمی با نیروی پیش بار پیچ دارد. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، این نیرو، در حالتی که پیچ با پیش بار ۵۰ کیلو نیوتن بسته می‌شود، بیشترین ناحیه را دارد و در حالتی که پیچ مقدار ۲ کیلو نیوتن است، این ناحیه کوچک‌ترین مقدار خود را دارد. نکته قابل توجه دیگر این است که شیب ناحیه بدون لغزش در تمام مدل‌ها، ثابت بوده و با

پیچ از ۲ نیوتن متر به ۵۰ نیوتن متر، باعث افزایش ۵۵ درصدی نیروی شکست می‌شود. افزایش گشتاور در مجموع باعث افزایش نیروی شکست شده است، هرچند این میزان افزایش از گشتاور ۴۰ نیوتن متر به ۵۰ نیوتن متر، تاثیر کمتری در نیروی شکست داشته است و فقط باعث افزایش یک درصدی نیروی شکست شده است. از این‌رو به تعبیری می‌توان بیان کرد که نیروی شکست در گشتاوری در حدود ۵۰ نیوتن متر، همگرا شده است.

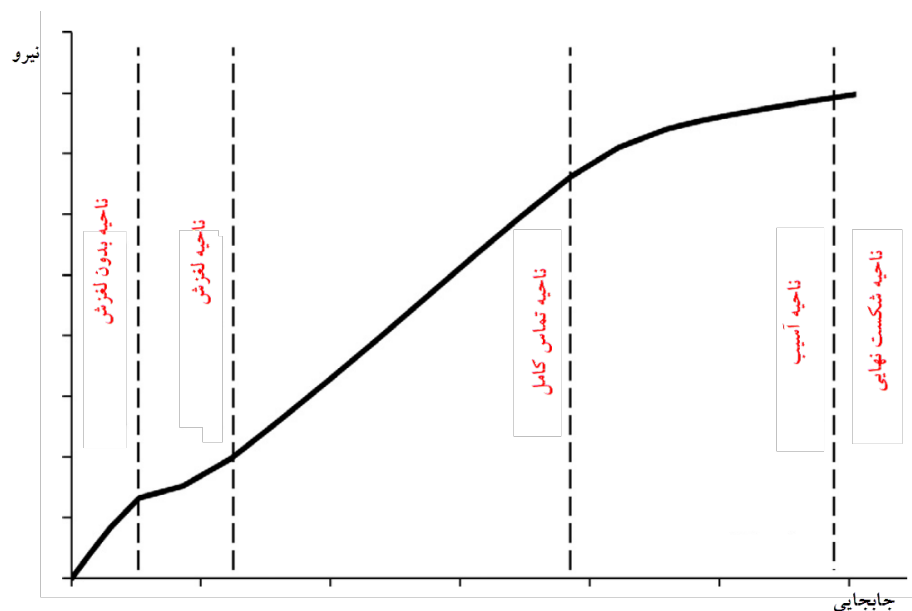
شکل ۴، نشان دهنده نمودار نیرو-جابجایی تمام نمونه‌های تست شده با گشتاورهای سفت‌کنندگی ۲ تا ۵۰ نیوتن متر می‌باشد. همانطور که در این نمودارها مشخص است، افزایش گشتاور سفت‌کنندگی و پیش بار پیچ اتصال، علاوه بر افزایش نیروی شکست اتصال، شیب نمودار نیرو-جابجایی را نیز افزایش داده است.

همچنین در تمام نمودارهای شکل ۴، شکست‌هایی مشاهده می‌شود که در آن‌ها شیب نمودار تغییر کرده است. این تغییر شیب بر اثر سرخوردن دو طرف اتصال و تغییر اصطکاک بین دو قطعه متصل شده رخ داده است. با افزایش پیش بار پیچ، این شکست نیز در نیروهای بزرگتر رخ می‌دهد که این موضوع نیز حکایت از چسبیدن بهتر و مستحکم‌تر دو طرف اتصال به یکدیگر دارد. اثر دیگر نیروهای افزایش پیش بار پیچ و یا گشتاور سفت کردن پیچ، کاهش جابجایی کل اتصال در لحظه شکست می‌باشد. که این موضوع در کنار افزایش ضریب اطمینان اتصال، باعث یکپارچگی قطعات در کنار یکدیگر و عملکرد بهتر سازه تشکیل شده از بخش‌های مختلف را دارد.



شکل ۴. نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه‌های مختلف

Fig. 4. Force-displacement diagram for different samples under tensile loading



شکل ۵. نواحی پنج گانه رفتار اتصال کامپوزیتی

Fig. 5. Five areas of composite bolted joint behavior



شکل ۶. نمونه ساخته شده، پیش از شروع آزمایش

Fig. 6. Experimental sample before the start of the test



شکل ۷. اتصال با گشتاور سفت کنندگی ۲ نیوتن بر متر پس از انجام آزمایش

Fig. 7. Joint with a tightening torque of 2 N/m after tensile testing

انجام شده سایر محققین می‌توان بیان کرد که شیب و طول ناحیه لغزش، ارتباطی به ضریب اصطکاک بین دو صفحه ندارد [۳۱].

ناحیه تماس کامل، ناحیه‌ای است که ساق پیچ به صورت کامل با دیوار سوراخ در صفحات کامپوزیتی در تماس قرار گرفته است. همانطور که در شکل ۴ و ۵ مشاهده می‌شود، شیب این ناحیه کمتر از ناحیه بدون لغزش است، هرچند طول این ناحیه بیشتر از ناحیه لغزش است. نکته قابل توجه دیگر این است که بر خلاف شیب ناحیه بدون لغزش که بدون ارتباط با مقدار پیش بار بود و در همه نمونه‌ها مقداری ثابت داشت، شیب ناحیه تماس در نمونه‌های با پیش بار متفاوت مختلف است. ناحیه بعدی که ناحیه آسیب می‌باشد، با کاهش شیب شیب نمودار به خوبی قابل شناسایی است. در این ناحیه آسیب کامپوزیت شروع شده و موده‌های متفاوتی می‌تواند داشته باشد که در بخش بعدی به طور کامل مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳-۱-۲- ارزیابی مود شکست نمونه‌های پیش بار

در این بخش، اثر گشتاور سفت کردن پیچ بر مود شکست اتصال مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل ۶ نشان دهنده نمونه ساخته شده برای انجام آزمون‌ها، پیش از شروع آزمایش می‌باشد. در ادامه، در شکل‌های ۷ تا ۹،

افزایش نیروی پیش بار تغییری نمی‌کند. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که شیب ناحیه بدون لغزش به سفتی صفحات اتصال مرتبط است.

لغزش زمانی شروع می‌شود که بیشترین نیروی اتصال از اصطکاک بین صفحات فراتر رود. از این نقطه، صفحات شروع به لغزیدن کرده و فضای بین سوراخ و پیچ شروع به پر شدن می‌کند. در این قسمت، در زمان پر شدن فاصله بین پیچ و سوراخ، افزایش نیروی محسوسی در اتصال مشاهده نمی‌شود. به دلیل اختلاف بین قطرهای سوراخ و پیچ و همچنین تغییر شکل ناشی از خمش پیچ، اولین نقطه تماس بین سوراخ و پیچ به صورت موضعی می‌باشد. از آنجا که اتصال با پیچ و مهره است، با پر شدن این فاصله عملاً ساق پیچ به صورت یکنواخت با لبه صفحات در تماس خواهد بود. طول این ناحیه بستگی به فاصله بین سوراخ و ساق پیچ دارد که این فاصله نیز عملاً بر طبق استاندارد انتخاب شده است. تغییر جابجایی اعمال شده در مرحله لغزش، تقریباً برابر با مقدار فاصله اختلاف بین قطر پیچ‌ها و سوراخ‌ها به اضافه ناحیه انتقال می‌باشد. گفتنی است حتی اگر مقدار فاصله ایجاد شده بین پیچ و سوراخ نیز صفر باشد، باز مقدار کوچکی به عنوان ناحیه انتقال وجود خواهد داشت، که به دلیل بزرگ شدن سوراخ‌های موجود در صفحه‌های کامپوزیتی ناشی از نیروی سفت‌کنندگی پیچ می‌باشد. با بررسی مطالعات



شکل ۸. اتصال با گشتاور سفت کنندگی ۳۰ نیوتن بر متر پس از انجام آزمایش

Fig. 8. Joint with a tightening torque of 30 N/m after tensile testing



شکل ۹. اتصال با گشتاور سفت کنندگی ۵۰ نیوتن بر متر پس از انجام آزمایش

Fig. 9. Joint with a tightening torque of 50 N/m after tensile testing

دارد. لذا ساق پیچ به قطعه کامپوزیتی نیروی قابل توجهی اعمال می‌کند که در نهایت این نیرو منجر به گسیختگی کامپوزیت از قسمت مقابل ساق شده است. هرچند میزان لغزش قطعات و جابجایی نمونه در زمان شکست کمتر از حالتی است که گشتاور سفت کنندگی ۲ نیوتن بر متر بوده است. این در حالی است که در نمونه با گشتاور سفت کنندگی ۵۰ نیوتن بر متر، شکل ۹، شکست قطعه کامپوزیتی فقط از کنار پیچ‌ها رخ داده است و قسمت مقابل ساق پیچ در اتصال سالم مانده است. دلیل این امر عدم لغزیدن قطعات بر روی یکدیگر و عدم اعمال بار زیاد از طرف ساق پیچ به قطعه کامپوزیتی می‌باشد. همانطور که در تصاویر مشاهده می‌شود، گشتاور سفت کردن پیچ، علاوه بر تاثیر در نیروی شکست، جابجایی اتصال تا لحظه شکست، همچنین بر مود شکست اتصال نیز تاثیرگذار است.

نمونه‌های با گشتاور سفت کنندگی پیچ ۲، ۳۰ و ۵۰ نیوتن بر متر، پس از انجام آزمون نشان داده شده است.

همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، در این اتصال، عملاً نیرو بر ساق پیچ وارد شده است. قطعه، لغزیده و پس از جابجایی بسیار، ساق پیچ به قطعه کامپوزیتی نیرو اعمال کرده است تا در نهایت قطعه گسیخته شده است. جابجایی بسیار زیاد قطعه و همچنین مشخص بودن شکل پیچ در نمونه، به خوبی در تصویر مشاهده می‌شود.

شکل ۸ نشان دهنده نمونه با گشتاور سفت کنندگی ۳۰ نیوتن بر متر می‌باشد. همانطور که در این تصویر مشاهده می‌شود، کامپوزیت از دو بخش دچار گسیختگی شده است. بخش اول در مقابل ساق پیچ قرار دارد و بخش دوم در کنار پیچ قرار دارد. در این نمونه، نیز به دلیل کم بودن پیش بار پیچ، امکان لغزش دو قطعه اتصال بر روی یکدیگر وجود

جدول ۶. ضریب گشتاور پیچشی پیشنهادی باومن [۳۳]

Table 6. Baumann's proposed torque coefficient

شرایط پیچ	K
بدون روکش، پوشش سیاه	۰/۳
با روکش روی	۰/۲
روانکاری شده	۰/۱۸
با روکش کادمیمی	۰/۱۶
پیچ‌های ضد گریپاژ باومن	۰/۱۲
مهره‌های ضامن دار باومن	۰/۹

$$T = \left[\left(\frac{d_m}{2d} \right) \left(\frac{\tan \lambda + f \cdot \sec \alpha}{1 - f \cdot \tan \lambda \cdot \sec \alpha} \right) + 0.625 f_c \right] f_t d \quad (۱)$$

می‌توان کل عبارت درون کروشه را K یا همان ضریب گشتاور پیچشی در نظر گرفت و معادله را به شکل زیر ساده کرد:

$$T = K f_t d \quad (۲)$$

که ضریب اصطکاک، به پرداخت سطح، دقت و میزان روانکاری بستگی دارد. باومن، یکی از بزرگترین تولیدکنندگان پیچ و اتصالات، مقادیر موجود در جدول ۶ را برای ضریب گشتاور پیچشی پیچ‌ها پیشنهاد داده است. با استفاده از روابط ۱ و ۲ و جدول ۵، میزان گشتاور پیچ‌های مختلف برای تولید پیش باری به میزان ۲۵ کیلونیوتن، که بر اساس آزمون‌های تجربی، پیش بار موثر می‌باشد طبق جدول ۷ محاسبه شده است.

۳-۲-۱- ارزیابی نیروی شکست در آزمون چیدمان پیچ

پس از انجام آزمون‌ها نتایج بدست آمده برای نمونه‌های مختلف در جدول ۸ نشان داده شده است. گفتنی است برای هر سری از تست‌ها پنج نمونه مورد آزمایش قرار گرفته است. که انحراف معیار حاصل از همه نمونه‌ها نیز در جدول ۸ ارائه شده است. مطابق با استاندارد D 5961/D 5961

۳-۲- ارزیابی چیدمان های مختلف اتصال

موثرترین میزان پیش بار پیچ‌ها از آزمون‌های دیگری استخراج شده است که در آن مجموعه آزمون، اتصال تک پیچ با پیچ شماره M10، با پیش بارهای متفاوت مورد آزمون و ارزیابی قرار گرفته‌اند. بیشترین نیروی شکست اتصال متعلق به حالتی بوده است که پیش بار پیچ اتصال، مقدار ۲۷/۷ کیلونیوتن را داشته باشد. از این‌رو، با تعیین میزان پیش بار موثر در مجموعه آزمایشی دیگر، در آزمون‌های یاد شده در این مقاله مقدار پیش بار ثابت و در عدد تعیین شده در نظر گرفته شد. و فقط چیدمان، شماره پیچ و تعداد پیچ‌ها، در اتصالات تغییر می‌کنند. با توجه به اینکه در عمل، اندازه‌گیری پیش بار پیچ با سختی‌هایی همراه است که نیازمند ابزار ویژه‌ای می‌باشند، به‌جای اندازه‌گیری پیش بار پیچ، گشتاور پیچشی وارده به پیچ برای سفت کردن پیچ را می‌توان اندازه گرفت. اندازه‌گیری گشتاور سفت کردن پیچ، و یا پیش بار وارده به پیچ، هر دو کاربردی و در صنعت رایج می‌باشد که با توجه به ابزار موجود می‌توان از هر کدام از آنها استفاده کرد. البته شایان ذکر است که بر اساس روابط ارائه شده در مرجع [۳۲]، اندازه‌گیری گشتاور سفت کردن پیچ دقیقاً معادل اندازه‌گیری میزان پیش بار وارده به اتصال می‌باشد، و در عمل تفاوتی بین این دو موضوع نیست. از این‌رو در پیچ‌های مختلف، باید گشتاور متناظر برای ایجاد پیش بار ۲۵ کیلونیوتن را محاسبه کرد. برای این منظور می‌توان از روابط شماره ۱ و ۲ استفاده کرد. رابطه بین گشتاور پیچشی و پیش بار پیچ با در نظر گرفتن ضریب اصطکاک عبارت است از :

جدول ۷. پیش بار محاسبه شده برای نمونه های مختلف

Table 7. Calculated preload for different samples

ردیف	چیدمان پیچ	گشتاور بستن پیچ ها (نیوتن متر)	مجموع نیروی پیش کشش اعمالی بین دو قطعه اتصال (کیلو نیوتن)
۱	۵ پیچ M8	۴۰	۱۲۵
۲	۴ پیچ M10	۵۰	۱۰۰
۳	۳ پیچ M12	۶۰	۷۵
۴	۲ پیچ M16	۸۰	۵۰

جدول ۸. نیروی شکست برای نمونه های مختلف، بدست آمده از آزمون تجربی

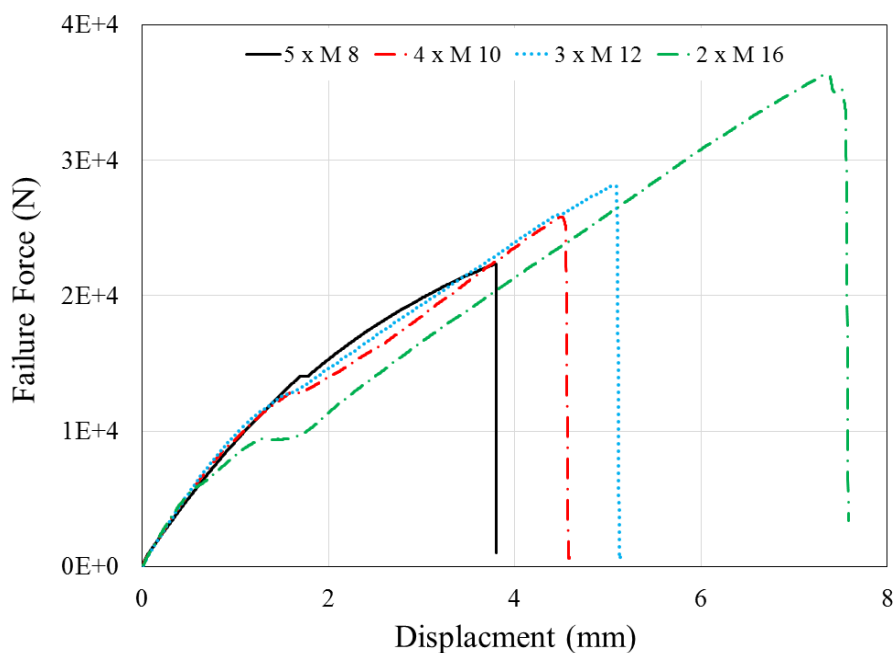
Table 8. The failure force for different samples obtained from the experimental test

نمونه	گشتاور بستن پیچ (نیوتن متر)	نیروی شکست (کیلو نیوتن)	انحراف معیار
۱	۵ پیچ M8	۲۲/۳۱	۰/۳۸
۲	۴ پیچ M10	۲۵/۷۷	۰/۴۱
۳	۳ پیچ M12	۲۸/۸۷	۰/۴۳
۴	۲ پیچ M16	۳۶/۴۹	۰/۳۶

تمرکز تنش در همه نمونه ها یکسان است. این ضریب مطابق با مرجع [۳۴] برابر ۲٫۵ است که در هر ۴ چیدمان پیچ ثابت است.

شکل ۱۰، نشان دهنده نمودار نیرو-جابجایی همه چیدمان های آزمون شده است. همانطور که در نمودارها مشاهده می شود، چیدمان دو پیچ M16 بیشترین نیروی شکست را دارد. به نحوی که نیروی شکست این چیدمان ۶۳ درصد بیشتر از نیروی شکست اتصال با پنج پیچ M8 می باشد. میزان جابجایی رخ داده تا لحظه شکست نیز با افزایش نیروی شکست در اتصالات افزایش یافته است. نکته قابل توجه دیگر این است که در ابتدای آزمون، شیب نمودار نیرو-جابجایی برای همه حالت ها یکسان است. سپس با افزایش نیرو، این شیب شکسته و تغییر می کند. این نقطه شکست، زمانی

M انجمن آزمایش و مواد امریکا که آزمون ها بر مبنای آن انجام شده است، انحراف معیار قابل پذیرش برای نتایج ۲ می باشد که انحراف معیار بدست آمده برای همه سری آزمون ها، در محدوده مجاز و قابل پذیرش قرار دارد. همانطور که در جدول ۸ مشاهده می شود، بیشترین نیروی شکست برای چیدمان دو پیچ M16 می باشد. این موضوع بر خلاف تصور اولیه است، چرا که نیروی اصطکاک بین دو قطعه اتصال در این چیدمان کمترین حالت را دارد. همانطور که در جدول ۵ مشاهده می شود، در این حالت از چیدمان پیچ ها، نیروی فشاری که منجر به اصطکاک دو قطعه می گردد، کمتر از حالت های دیگر است. بیشترین نیرو متعلق به چیدمانی است که ۵ پیچ دارد. این در حالی است که به دلیل ثابت بودن نسبت های e/d ، w/d ، ضریب



شکل ۱۰. نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه‌های مختلف

Fig. 10. Force-displacement diagram for different samples

مرحله، کاملاً مشابه یکدیگر می‌باشد و عملاً چیدمان پیچ‌ها تأثیری در شیب این بخش از نمودار ندارد. این چیدمان در طول این ناحیه موثر است ولی شیب اتصال به سفتی صفحات کامپوزیتی مرتبط می‌باشد. ناحیه دوم ناحیه لغزش می‌باشد که در آن تقریباً مقاومتی در برابر جابجایی صفحات وجود ندارد. طول این ناحیه در نمونه‌های مختلف متفاوت می‌باشد. ناحیه بعدی نیز مربوط به تماس کامل است که تا شکست ادامه می‌یابد. شیب نمونه‌ها در چیدمان‌های مختلف، حدوداً یکسان است. بیشترین طول این ناحیه مربوط به چیدمان اتصال با دو پیچ M16 می‌باشد که در اصل بیشترین نیروی شکست اتصال را نیز دارد. نکته قابل توجه این است که چیدمان اتصال در نیروی شکست اتصال ارتباط مستقیمی دارد و با تغییر نوع چیدمان، نیروی شکست اتصال نیز تغییر می‌کند اما شیب نمودار تقریباً ثابت است و با تغییر اتصال تغییر چندانی نمی‌کند.

۳-۲-۲- ارزیابی وضعیت قطعات بعد از شکست اتصال در آزمون چیدمان پیچ

در این بخش، وضعیت قطعات بعد از شکست چیدمان اتصالات بررسی می‌شود. تصویر اتصالات بعد از شکست در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است. شکل ۱۱ اتصال با دو پیچ M16 را نشان می‌دهد و شکل ۱۲

است که نیروی کشیدگی اتصال بیش از نیروی اصطکاک موجود شده و دو قطعه در دو طرف اتصال نسبت به یکدیگر می‌لغزند. از این لحظه به بعد، عملاً نیروی اتصال با مقاومت کامپوزیت‌ها از برخورد با ساق پیچ‌ها تامین می‌شود. برای همین خاطر شیب نمودار متفاوت از زمانی است که دو قطعه نسبت به یکدیگر دارای اصطکاک و بدون لغزش می‌باشند.

سریع‌ترین لغزش در اتصال با چیدمان دو پیچ M16 رخ داده است. در حالی که اتصال با چیدمان ۵ پیچ M8 دیرتر از همه اتصالات دچار لغزش شده است. به بیان دیگر در این چیدمان، نیروی بیشتری برای لغزش دو طرف اتصال مورد نیاز بوده است. دلیل این امر هم می‌تواند وجود پیش بار بیشتر در این چیدمان نسبت به چیدمانی که در آن شماره پیچ‌ها افزایش یافته و تعداد آن‌ها کاهش یافته است، باشد. به نحوی که نیروی لغزش در اتصال با ۵ پیچ M8، ۱۴۷ درصد بیشتر از نیروی لغزش اتصال با دو پیچ M16 می‌باشد.

نکته قابل توجه دیگر این است که نواحی معرفی شده در شکل ۶ نیز همچنان در آزمون‌های چیدمان اتصال مشاهده می‌شود. در این آزمون‌ها هم در ابتدا یک ناحیه قرار دارد که در آن هیچ لغزشی بین صفحات اتصال قرار ندارد. شایان ذکر است که سفتی تمام نمونه‌های پیشنهادی اتصال در این



شکل ۱۱. وضعیت قطعه بعد از شکست اتصال با دو پیچ M16

Fig. 11. State of bolted joint using two M16 bolts after the failure



شکل ۱۲. وضعیت قطعه بعد از شکست اتصال با پنج پیچ M8

Fig. 12. State of bolted joint using five M8 bolts after the failure

کامپوزیتی و غلبه نیروی وارده به اصطکاک بین دو قطعه، بین ساق پیچ و لبه سوراخ تماس برقرار می‌شود. تا زمان تماس کامل بین ساق پیچ و لبه کامپوزیت، عملاً در نمونه فقط جابجایی رخ می‌دهد و هیچ نیروی مقاومتی در برابر این جابجایی ایجاد نمی‌شود. پس از این که پیچ‌ها با لبه سوراخ تماس ایجاد کردند؛ عملاً نیروی اتصال شروع به افزایش می‌کند. این تماس می‌تواند در هر کدام از پیچ‌های اتصال با چند پیچ رخ دهد. در اینجا با توجه به اینکه سوراخ کاری نمونه‌های تجربی با دقت و بر اساس استاندارد مطرح شده انجام شده است، فاصله همه پیچ‌ها و سوراخ‌ها تقریباً یکسان است. از اینرو می‌توان گفت که همه پیچ‌ها تقریباً همزمان به لبه سوراخ برخورد می‌کنند. از اینرو عملاً پیچ اول در ردیف اتصالات دچار گسیختگی می‌گردد.

نشان دهنده شکست اتصال برای چیدمان پنج پیچ M8 می‌باشد. همانطور که در این دو تصویر مشاهده می‌شود، شکست از پیچ اول شروع شده است. از لبه‌های سوراخ گسیختگی شروع شده و تا لبه قطعه ادامه یافته است. ضمناً این گسیختگی با لایه لایه شدن گسترده کامپوزیت در اطراف سوراخ رخ می‌دهد. حجم وسیع لایه لایه شدن نیز در همه چیدمان‌های پیچ مشاهده می‌شود که در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نیز نشان داده شده است. همچنین مشاهده می‌شود که شکست و لایه لایه شدن کامپوزیت فقط در یکی از پیچ‌ها رخ داده است و بقیه پیچ‌ها در تماس با کامپوزیت و کامپوزیت‌های اطراف آن‌ها سالم هستند.

این موضوع نشان دهنده این مطلب است که پس از سر خوردن ورق‌های

۴- نتیجه گیری

در مقاله اتصالات کامپوزیتی پوسته ناسل و دماغه توربین بادی دو مگاواتی ملی مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به سایز توربین بادی، ابعاد پوسته ناسل و دماغه از بسیار بزرگ می باشد. علاوه بر بزرگی ابعاد، با توجه به مشکلات مونتاژ و نصب، امکان ساخت یکپارچه این قطعات وجود ندارد. از اینرو، به ناچار باید قطعات کامپوزیتی را به یکدیگر متصل کرد. برای بدست آوردن بهترین چیدمان پیچ یک سری آزمایش ترتیب داده شد که در گام اول، پیش بار مناسب برای اتصالات کامپوزیتی با جنس کامپوزیت مورد استفاده در ساخت پوسته ناسل بدست آمده و در ادامه در گام دوم چیدمان پیچ ها با یکدیگر مقایسه شدند. در نهایت می توان نتایج زیر را به صورت خلاصه بیان کرد:

➤ افزایش گشتاور سفت کردن پیچ، تاثیر بسزا و چشمگیری در نیروی شکست اتصال دارد. به نحوی که افزایش گشتاور از ۲ به ۵۰ نیوتن متر، باعث افزایش ۵۵ درصدی نیروی شکست اتصال می گردد.

➤ افزایش گشتاور سفت کردن پیچ، جابجایی در لحظه شکست اتصال و نحوه شکست قطعه را نیز تحت تاثیر قرار می دهد.

➤ استفاده از پیچ های M16، می تواند نیروی نهایی شکست اتصال را افزایش دهد. اما این چیدمان از پیچ ها، ناحیه بدون لغزش بسیار کوچکی نسبت به چیدمان های دیگر دارد.

➤ نیروی شکست اتصال M16، ۶۷ درصد بیشتر از اتصال با پیچ M8 می باشد. در حالیکه مقاومت به لغزش قطعات نسبت به یکدیگر در اتصال با پیچ M8، ۱۴۷ درصد بیشتر از اتصال با پیچ M16 می باشد. مقاومت به لغزش از اینرو حایز اهمیت است که بعد از طی این ناحیه، ساق پیچ با لبه کامپوزیتی قطعه برخورد می کند و عملاً لبه گرد سوراخ در قطعه کامپوزیتی بارگیر می شود و می تواند دچار تغییر شکل گردد. این موضوع تکرارپذیری استفاده از همان سوراخ بدون هیچ گونه پروسه تعمیر را زیر سوال می برد و از آنجا که با توجه به ماهیت توربین بادی در عمر بیست ساله خود، قطعات مختلف موجود در ناسل و دماغه نیاز به تعمیرات مکرر دارند، احتمال باز شدن چند باره اتصالات و استفاده مجدد از آن ها زیاد است. اما از طرفی هم استفاده از پیچ های کوچکتر، منجر به کاهش فاصله پیچ ها، و افزایش تعداد پیچ ها می گردد. که این موضوع عملاً باعث افزایش زمان مونتاژ و به تبع آن افزایش هزینه ساخت خواهد شد.

➤ در مجموع با بررسی تمام جوانب و نقاط مثبت و منفی هر کدام از چیدمان ها، استفاده از چیدمان پیچ های M12 با نیروی پیش کشش

۷۵ کیلونیوتن بهترین حالت برای قطعات کامپوزیتی پوسته ناسل و دماغه می باشد.

منابع

- [1] A. Qazi, C. Bhowmik, F. Hussain, S. Yang, U. Naseem, A.-A. Adebayo, A. Gumaei, M. Al-Rakhami, Analyzing the public opinion as a guide for renewable-energy status in Malaysia: A case study, *IEEE Transactions on Engineering Management*, 99 (2021) 1-15.
- [2] N. Kilinc-Ata, The evaluation of renewable energy policies across EU countries and US states: An econometric approach, *Energy for Sustainable Development*, 31 (2016) 83-90.
- [3] C. Harvey, N. Heikkinen, Congress Says Biomass Is Carbon-Neutral, but Scientists Disagree, *Scientific American E&E News Environment, USA*, (23 March 2018) Archived from the original on 1 November 2020. Retrieved 31 October 2020.
- [4] S.A. Moussavi, A. Ghaznavi, Effect of boundary layer suction on performance of a 2 MW wind turbine, *Energy*, 232 (2021) 121072.
- [5] G.M. Pearce, A.F. Johnson, R.S. Thomson, D.W. Kelly, Experimental investigation of dynamically loaded bolted joints in carbon fibre composite structures, *Applied Composite Materials*, 17 (2010) 271-291.
- [6] J. Ekh, Multi-fastener single-lap joints in composite structures, PhD diss., KTH, 2006.
- [7] M.B. Tate, Preliminary investigation of the loads carried by individual bolts in bolted joints, 1946.
- [8] W. Barrois, Stresses and displacements due to load transfer by fasteners in structural assemblies, *Engineering fracture mechanics*, 10(1) (1978) 115-176.
- [9] W.D. Nelson, B.L. Bunin, L.J. Hart-Smith, Critical joints in large composite aircraft structure, *Nasa*, 1983.
- [10] M. McCarthy, C. McCarthy, G. Padhi, A simple method for determining the effects of bolt-hole clearance on load distribution in single-column multi-bolt composite joints, *Composite Structures*, 73(1) (2006) 78-87.
- [11] M. McCarthy, V. Lawlor, W. Stanley, C. McCarthy, Bolt-

- [21] G. Pearce, A. Johnson, A. Hellier, R. Thomson, A study of dynamic pull-through failure of composite bolted joints using the stacked-shell finite element approach, *Composite Structures*, 118 (2014) 86-93.
- [22] J. Hassan, R.M. O'Higgins, T. Feser, M. Waimer, C.T. McCarthy, N. Toso, M.A. McCarthy, Influence of layup, stacking sequence and loading rate on energy absorption of tension-absorber joints, *Composite Structures*, 261 (2021) 113327.
- [23] V.G. Belardi, P. Fanelli, F. Vivio, A novel composite bolted joint element: Application to a single-bolted joint, *Procedia Structural Integrity*, 12 (2018) 281-295.
- [24] E.S. Greenhalgh, C. Canturri, T.J. Katafiasz, Fractographic study into the effect of drilling damage on bearing mechanisms and performance in Carbon-Fibre epoxy composites, *Engineering Failure Analysis*, 129 (2021) 105638.
- [25] J. Wang, T. Qin, N.R. Mekala, Y. Li, M. Heidari-Rarani, K.-U. Schröder, Three-dimensional progressive damage and failure analysis of double-lap composite bolted joints under quasi-static tensile loading, *Composite Structures*, 285 (2022) 115227.
- [26] J.-I. Choi, S.M. Hasheminia, H.-J. Chun, J.-C. Park, H.S. Chang, Failure load prediction of composite bolted joint with clamping force, *Composite Structures*, 189 (2018) 247-255.
- [27] A. VanderKlok, A. Dutta, S.A. Tekalur, Metal to composite bolted joint behavior evaluated at impact rates of loading, *Composite Structures*, 106 (2013) 446-452.
- [28] A. Ghaznavi, M. Asgari, A. Saeidi, M. Ramyar, A. Bahri, H. Lari, Finite element modeling of debonding behavior of adhesively-bonded joints between sandwich panel and pultruded profile in flexural loading, *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, 6 (2016) 107-116 (in Persian).
- [29] ISO 286-1:2010(en), Geometrical product specifications (GPS) - ISO code system for tolerances on linear sizes- Part 1: Basis of tolerances, deviations and fits, Chapter 6 (2010).
- [30] ASTM Standard D 5961/D 5961 M-96. Standard test method for bearing response of polymer matrix hole clearance effects and strength criteria in single-bolt, single-lap, composite bolted joints, *Composites science and technology*, 62(10-11) (2002) 1415-1431.
- [12] V.P. Lawlor, M.A. McCarthy, W. Stanley, An experimental study of bolt-hole clearance effects in double-lap, multi-bolt composite joints, *Composite structures*, 71(2) (2005) 176-190.
- [13] G. Padhi, M. McCarthy, C. McCarthy, BOLJAT: a tool for designing composite bolted joints using three-dimensional finite element analysis, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 33(11) (2002) 1573-1584.
- [14] P.P. Camanho, F. Matthews, A progressive damage model for mechanically fastened joints in composite laminates, *Journal of composite materials*, 33(24) (1999) 2248-2280.
- [15] K.B. Katnam, L. Da Silva, T. Young, Bonded repair of composite aircraft structures: A review of scientific challenges and opportunities, *Progress in Aerospace Sciences*, 61 (2013) 26-42.
- [16] J. Ekh, J. Schön, Effect of secondary bending on strength prediction of composite, single shear lap joints, *Composites science and technology*, 65(6) (2005) 953-965.
- [17] J. Ekh, J. Schön, Load transfer in multirow, single shear, composite-to-aluminium lap joints, *Composites Science and Technology*, 66(7-8) (2006) 875-885.
- [18] M. McCarthy, C.T. McCarthy, V.P. Lawlor, W.F. Stanley, Three-dimensional finite element analysis of single-bolt, single-lap composite bolted joints: part I—model development and validation, *Composite structures*, 71(2) (2005) 140-158.
- [19] C.T. McCarthy, M.A. McCarthy, V. Lawlor, Progressive damage analysis of multi-bolt composite joints with variable bolt-hole clearances, *Composites Part B: Engineering*, 36(4) (2005) 290-305.
- [20] C. Stocchi, P. Robinson, S. Pinho, A detailed finite element investigation of composite bolted joints with countersunk fasteners, *Composites Part A: applied science and manufacturing*, 52 (2013) 143-150.

- 2004.
- [33] M. Fonte, L. Reis, V. Infante, M. Freitas, Failure analysis of cylinder head studs of a four stroke marine diesel engine, *Engineering Failure Analysis*, 101 (2019) 298-308.
- [34] W.D. Pilkey, D.F. Pilkey, Z. Bi, *Peterson's stress concentration factors*, John Wiley & Sons, 2020.
- composite laminates; (2007).
- [31] B. Egan, C.T. McCarthy, M. McCarthy, R. Frizzell, Stress analysis of single-bolt, single-lap, countersunk composite joints with variable bolt hole clearance, *Composite Structures*, 94(3) (2012) 1038-1051.
- [32] J.E. Shigley, C.R. Mischke, T.H. Brown Jr, *Standard handbook of machine design*, McGraw-Hill Education,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Ghaznavi, S. A. Moussavi, *Experimental Study of Preload and Bolt Arrangement on Composite Joint Performance in Megawatt Wind Turbine's Nacelle Cover and Nose Cone*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 55(7) (2023) 837-856.

DOI: 10.22060/mej.2023.21559.7466



