



## بررسی خواص مکانیکی و استحکام برشی همپوشان چسب‌های پایه اپوکسی حاوی نانو لوله های هالوسایت در

### اتصالات کامپوزیت به فلز

آناهیتا دهقانی<sup>۱</sup>، امید معینی جزنی<sup>۲</sup>، مجید سهرابیان<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران. صندوق پستی: ۷۳۴۴۱-۸۱۷۴۶

<sup>۲</sup> گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران. صندوق پستی: ۷۳۴۴۱-۸۱۷۴۶

<sup>۳</sup> گروه مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. صندوق پستی: ۱۷۱۹-۱۶۷۶۵

\* مسئول مکاتبات، پیام نگار: [o.moini@eng.ui.ac.ir](mailto:o.moini@eng.ui.ac.ir)

#### چکیده

در این پژوهش به بررسی خواص مکانیکی اتصالات چسبی تک‌لبه قطعات کامپوزیت به فلز، پرداخته شد. کامپوزیت مورد استفاده از جنس رزین اپوکسی/الیاف کربن و فلز مورد استفاده از جنس فولاد ضدزنگ ۳۱۶L است. پایه چسب مورد استفاده یک آلیاژ پلیمری از جنس رزین اپوکسی- فنولیک می‌باشد. رزین اپوکسی از نوع DGEBA و رزین فنولیک از نوع نووالاک می‌باشد. به دلیل طبیعت شکننده چسب اپوکسی، از تقویت‌کننده نانولوله هالوسایت برای بهبود خواص مکانیکی چسب استفاده می‌شود. در این راستا اثر افزودن نانولوله هالوسایت در سه ترکیب درصد (۷ phr، ۵، ۲) به رزین اپوکسی مورد بررسی قرار گرفت. به منظور بررسی خواص مکانیکی چسب‌ها و هم‌چنین خواص چسبندگی آن‌ها، نمونه‌های دمبلی‌شکل و اتصال تک‌لبه فلز (فولاد ضدزنگ) به کامپوزیت (رزین اپوکسی/الیاف کربن) تهیه شد و از آن‌ها تست کشش گرفته شد. نتایج نشان داد با افزودن ۲ phr هالوسایت به رزین اپوکسی، ۱۶۹/۴۶٪ افزایش در استحکام کششی، ۷۹/۵۷٪ افزایش در مدول و ۳۱۸/۱۳٪ افزایش در چقرمگی نسبت به نمونه خالص در نمونه‌های دمبلی‌شکل مشاهده می‌شود؛ و با افزودن ۲ phr هالوسایت به رزین اپوکسی در نمونه‌های اتصال فلز به کامپوزیت، استحکام برشی به میزان ۸۲/۸۵٪، مدول به میزان ۶۶/۹۷٪ و چقرمگی به میزان ۱۴۸/۹۴٪ نسبت به نمونه خالص افزایش داشت.

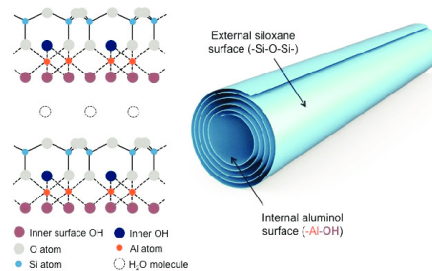
**کلید واژگان:** چسب اپوکسی، نانولوله هالوسایت، خواص مکانیکی

#### ۱- مقدمه

امروزه کاربردهای اتصالات چسبی با توجه به افزایش استفاده از مواد کامپوزیتی در صنایع هوافضا، خودرو و ساخت‌وساز رو به افزایش است. از میان تمام چسب‌ها، چسب‌های پایه اپوکسی بیش‌ترین کاربرد را در اتصال قطعات فلز به کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کربن در صنایع هوافضا دارند [۱]. رزین‌های اپوکسی پلیمرهایی هستند که چسبندگی خوب، قیمت پایین، سهولت پخت و جمع‌شدگی اندک در حین پخت از ویژگی‌های آن‌هاست [۲]. با این حال، با توجه به خاصیت شکننده بودن ذاتی رزین‌های اپوکسی، استفاده از آن‌ها در برخی کاربردها محدود شده است. برای غلبه بر این محدودیت‌ها، از افزودنی‌هایی نظیر رابرها، پرکننده‌ها و عوامل پخت می‌توان استفاده کرد [۳]. نانوذرات با توجه به ساختار شیمیایی، اندازه ذرات و شکل هندسی‌شان می‌توانند خواص اپوکسی را برای کاربردهای متنوع بهبود بخشند [۴]. کیم و هم‌کارانش در سال ۲۰۰۸ به بررسی اثر افزودن نانورس به رزین اپوکسی پرداختند. نتایج نشان داد که با افزودن ۵/۰٪ وزنی نانورس چقرمگی شکست ۲۰٪ و با افزودن ۳٪ وزنی نانورس چقرمگی شکست به میزان ۵۰٪



افزایش می یابد [۵]. جوجیبابو و هم کارانش در سال ۲۰۱۶ به بررسی اثر افزودن نانولوله کربنی تک جداره و دو جداره به چسب اپوکسی پرداختند. نتایج نشان داد که با افزودن ۱٪ وزنی نانولوله تک جداره و ۵٪ وزنی نانولوله دو جداره، استحکام اتصال به ترتیب به میزان ۵۳٪ و ۴۶٪ افزایش یافت [۶]. نانوذرات طبیعی معدنی، از جمله نانولوله های هالوسایت، با توجه به خواص ویژه ای که دارند، اخیرا بسیار مورد توجه قرار گرفته اند. هالوسایت ها به علت ساختار لوله ای و طبیعت سیلیکاتی که دارند، می توانند خواص مکانیکی و حرارتی پلیمرها را بهبود بخشند [۷]. ساختار هالوسایت در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱. ساختار هالوسایت [۸]

در این پژوهش به بررسی خواص مکانیکی اتصالات چسبی تک لایه قطعات کامپوزیت به فلز، پرداخته شد. پایه چسب مورد استفاده یک آلیاژ پلیمری از جنس رزین اپوکسی- فنولیک حاوی نانولوله های هالوسایت می باشد. رزین اپوکسی از نوع DGEBA و رزین فنولیک از نوع نووالاک می باشد.

## ۲- بخش تجربی

### مواد:

رزین اپوکسی دی گلیسیسیدیل اتر بیس فنل آ (DGEBA)، رزین فنولیک نووالاک، عامل پخت تری اتیلن تترامین (TETA)، نانولوله هالوسایت با میانگین سایز ذرات با قطر ۴۰ نانومتر، متانول، زایلن و استون.

### تجهیزات:

در تهیه نمونه چسب ها جهت پخش یکنواخت مواد در ماتریس اپوکسی از همزن مکانیکی مدل Heidolph RZR 2041 استفاده شد. با توجه به آزمون خواص کششی پلاستیک ها (ISO 527-1,2,3)، قالب های دمبلی با ابعاد استاندارد مورد استفاده قرار گرفتند. ضخامت این قالب ۵ میلی متر می باشد. مطابق با استاندارد ASTM D5868 قطعه های فلزی از جنس فولاد ضد زنگ L ۳۱۶ با ابعاد ۱۰/۱۶×۱/۵×۲۵/۴ میلی متر و قطعه های کامپوزیتی از جنس رزین اپوکسی / الیاف کربن با ابعاد ۱۰/۱۶×۲/۵×۲۵/۴ میلی متر جهت تشکیل اتصالات تک لایه فلز- کامپوزیت مورد استفاده قرار گرفتند.

### آزمون ها:

آزمون تعیین خواص کششی نمونه های دمبلی شکل:

با توجه به استاندارد (ISO 527-1,2,3)، نمونه های دمبلی شکل تحت بارگذاری کششی ۲ mm/min قرار می گیرند. این تست توسط دستگاه تست کشش مدل STM-150، موجود در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه اصفهان، انجام گرفت.

آزمون چسبندگی تک لایه:



مطابق با استاندارد ASTM D5868، نمونه‌های اتصال فلز به کامپوزیت در دستگاه تست کشش قرار می‌گیرند و مقدار طولی که در فک‌های دستگاه کشش قرار می‌گیرد، ۲۵/۴ میلی‌متر و سرعت بارگذاری نیز ۱۳ میلی‌متر بر دقیقه است.

### روش انجام آزمایش:

مقادیر مورد نظر از هالوسایت به میزان کمی استون اضافه می‌شود و به مدت ۳۰ دقیقه بر روی هم‌زن مغناطیسی قرار می‌گیرد تا در استون حل گردد. به ۲۰ گرم اپوکسی میزان مشخصی زایلن افزوده و سپس هالوسایت حل شده در استون نیز به آن‌ها اضافه می‌شود و به مدت ۲ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد بر روی هم‌زن مغناطیسی قرار می‌گیرد تا هالوسایت در اپوکسی حل گردد [۹]. پس از آن، فنولیک را به ظرف واکنش اضافه کرده و بعد از این‌که به مدت ۵ دقیقه با سرعت ۱۵۰ دور در دقیقه هم‌زده شد، عامل پخت تری‌اتیلن‌تترا آمین به مخلوط اضافه و به مدت ۳ دقیقه دیگر هم‌زده می‌شود. مدت زمان پخت نمونه‌ها ۴ روز در دمای محیط می‌باشد. تعداد تکرار هر نمونه آزمایش ۳ مرتبه می‌باشد. فاکتورهای مورد آزمایش در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱. آزمایش‌های انجام شده

فکتورهای مورد آزمایش	نمونه (۱)	نمونه (۲)	نمونه (۳)
ترکیب درصد پرکننده هالوسایت (phr)	۲	۵	۷

### ۳- نتایج و بحث

در این بخش، نتایج آزمون کشش نمونه‌های دمبلی شکل و اتصال فلز به کامپوزیت مربوط به سه آزمایش، به ترتیب در جدول (۲) و جدول (۳) آورده شده است. این نتایج شامل چهار پاسخ استحکام، مدول، کرنش و چقرمگی می‌باشد. همچنین نتیجه آزمون کشش نمونه خالص به منظور مقایسه با نتایج سایر نمونه‌ها در جدول آورده شده است.

جدول ۲. نتایج حاصل از آزمون کشش نمونه‌های دمبلی شکل

شماره نمونه	استحکام کششی (MPa)	مدول (۰/۷۵-۰/۲۵) (MPa)	کرنش (%)	چقرمگی (Kj/m <sup>3</sup> )
نمونه خالص	۰/۶۶۸ ± ۰/۰۱۹	۱۳/۷۱ ± ۰/۰۶	۳/۲۸ ± ۰/۱۷	۱۳/۹۵ ± ۰/۱۱
۱	۱/۸ ± ۰/۰۳۲	۲۴/۶۲ ± ۰/۰۴	۵/۷۳ ± ۰/۰۳۳	۵۸/۳۳ ± ۰/۱۵
۲	۱/۶۷ ± ۰/۰۵۵	۲۸/۰۷ ± ۰/۰۱	۵/۶۳ ± ۰/۰۲۵	۵۳/۴۱ ± ۰/۱۸
۳	۰/۹۸ ± ۰/۰۹۲	۳۱/۷۸ ± ۰/۰۲۵	۵/۳ ± ۰/۰۲۳	۵۱/۷ ± ۰/۱۹

جدول ۳. نتایج حاصل از آزمون کشش نمونه‌های اتصال تک‌لبه فلز به کامپوزیت

شماره نمونه	استحکام برشی هم‌پوشان (MPa)	مدول (۰/۷۵-۰/۲۵) (MPa)	کرنش (%)	چقرمگی (Kj/m <sup>3</sup> )
نمونه خالص	۱/۴ ± ۰/۰۰۲	۴۱/۶ ± ۰/۱۵	۲/۸ ± ۰/۰۲۲	۳۴/۲۶ ± ۰/۱۴
۱	۲/۵۶ ± ۰/۰۰۵	۶۹/۴۶ ± ۰/۱۷	۳/۹۱ ± ۰/۰۰۶	۸۲/۳۱ ± ۰/۱۷
۲	۲/۴۲ ± ۰/۰۰۳۲	۷۵/۳ ± ۰/۰۲۲	۳/۲۸ ± ۰/۰۰۶	۷۶/۶ ± ۰/۰۲۱
۳	۲/۲۱ ± ۰/۰۰۴	۷۸/۷۱ ± ۰/۱۲	۳/۰۱۲ ± ۰/۰۰۴	۷۴/۵۴ ± ۰/۰۲۲



با توجه به جدول مشاهده می‌شود که بیش‌ترین استحکام مربوط به نمونه شماره ۱ و کم‌ترین آن مربوط به نمونه شماره ۳ می‌باشد. با افزودن جزء هالوسایت و پراکندگی مناسب آن در سیستم چسبی، مقاومت در برابر رشد ترک افزایش یافته و استحکام افزایش می‌یابد [۱۰]. در این آزمایش با افزایش جزء هالوسایت از نمونه ۱ به نمونه ۲ و ۳ کاهش در استحکام مشاهده می‌شود. هم‌چنین مشاهده می‌شود که، بیش‌ترین میزان مدول مربوط به نمونه ۳ و کم‌ترین میزان مربوط به نمونه ۱ می‌باشد. در نتیجه با افزایش جزء هالوسایت، مدول افزایش می‌یابد. با توجه به جدول، بیش‌ترین میزان چقرمگی مربوط به نمونه ۱ و کم‌ترین میزان چقرمگی مربوط به نمونه ۳ می‌باشد. با افزودن جزء هالوسایت چقرمگی افزایش می‌یابد. پیش‌بینی می‌شود پراکنش مناسب ذرات هالوسایت موجب افزایش چقرمگی می‌شود.

#### ۴- نتیجه‌گیری

با افزودن جزء هالوسایت کلیه خواص نسبت به نمونه چسب اپوکسی- فنولیک افزایش داشت. اما با افزایش جزء هالوسایت از ۲ phr به ۵ و ۷، کاهش در استحکام و چقرمگی مشاهده شد. هم‌چنین نتایج مشابهی برای نمونه‌های اتصال کامپوزیت به فلز مشاهده شد. در شرایط بهینه، یعنی با افزودن ۲ phr نانوذره هالوسایت به چسب اپوکسی- فنولیک، ۱۶۹/۴۶٪ افزایش در استحکام کششی، ۷۹/۵۷٪ افزایش در مدول و ۳۱۸/۱۳٪ افزایش در چقرمگی نسبت به نمونه خالص مشاهده شد؛ و هم‌چنین در نمونه‌های اتصال کامپوزیت به فلز، استحکام برشی به میزان ۸۲/۸۵٪، مدول به میزان ۶۶/۹۷٪ و چقرمگی به میزان ۱۴۸/۹۴٪ نسبت به نمونه خالص افزایش داشت.

#### مراجع

- [1] Li, Y., & Seidel, G. D. (2018). Multiscale modeling of the interface effects in CNT-epoxy nanocomposites. *Computational Materials Science*, 153, 363-381.
- [2] Zakaria, M. R., Kudus, M. H. A., Akil, H. M., & Thirmizir, M. Z. M. (2017). Comparative study of graphene nanoparticle and multiwall carbon nanotube filled epoxy nanocomposites based on mechanical, thermal and dielectric properties. *Composites Part B: Engineering*, 119, 57-66.
- [3] Dittanet, P., Pearson, R. A., & Kongkachuichay, P. (2017). Thermo-mechanical behaviors and moisture absorption of silica nanoparticle reinforcement in epoxy resins. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 78, 74-82.
- [4] Jouyandeh, M., Karami, Z., Jazani, O. M., Formela, K., Paran, S. M. R., Jannesari, A., & Saeb, M. R. (2019). Curing epoxy resin with anhydride in the presence of halloysite nanotubes: the contradictory effects of filler concentration. *Progress in Organic Coatings*, 126, 129-135.
- [5] Kim, B. C., & Park, S. W. (2008). Fracture toughness of the nano-particle reinforced epoxy composite. *Composite Structures*, 86(1), 69-77.
- [6] Jojibabu, Panta, et al. "Effect of different carbon nano-fillers on rheological properties and lap shear strength of epoxy adhesive joints." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 82 (2016): 53-64.
- [7] Deng, S., Zhang, J., & Ye, L. (2009). Halloysite-epoxy nanocomposites with improved particle dispersion through ball mill homogenisation and chemical treatments. *Composites Science and Technology*, 69(14), 2497-2505.
- [8] Soheilmoghaddam, M., Wahit, M. U., Mahmoudian, S., & Hanid, N. A. (2013). Regenerated cellulose/halloysite nanotube nanocomposite films prepared with an ionic liquid. *Materials Chemistry and Physics*, 141(2-3), 936-943.
- [9] Deng, S., Zhang, J., Ye, L., & Wu, J. (2008). Toughening epoxies with halloysite nanotubes. *Polymer*, 49(23), 5119-5127.
- [10] Ramamoorthi, R., & Sampath, P. S. (2015). Experimental Investigations of Influence of Halloysite Nanotube on Mechanical and Chemical Resistance Properties of Glass Fiber Reinforced Epoxy Nano Composites.