Review Article

Polymerization
Quarterly, 2023
Volume 13, Number 2
Pages 40-57
ISSN: 2252-0449

Introducing Airships and Polyurethane Adhesives of these Systems

Hajar Es-haghi[1*] and Zeinab Sadat Sheikholeslami[2]

1. Institute of Mechanics, Shiraz, Iran

2. Iran Polymer and Petrochemical Institute, P.O. Box 14975-112, Tehran, Iran

Received: 28 December 2021, Accepted: 26 June 2022

Abstract

Lighter than air systems (LTAs) are the new air navigation systems that usually float 20 km above the ground. It has been known that remote radio bases are defined at an altitude of 20 to 50 km above the ground, therefore, LTA systems have been considered as satellite communication networks. Today, the airship is contemplated one of the lighter than air systems as a carrier for humans and goods with low cost and maximum efficiency. The body of this system is composed of polymer multilayer structures including fibers, fabrics, and various film layers with a light gas (exp. H_2 and He) retention characteristic, high tensile modulus, high resistance to internal and external pressure, and tolerance to high-temperature changes. In order to connect the layers and their sealing strength, polymer adhesives with low-temperature tolerance, high tensile strength, and high flexibility are used. Despite the many studies on these systems, there are still many opportunities to study the LTA industry. Therefore, in the present article, an attempt has been made to take an effective step in searching these systems and their types and identifying the components through the introduction of airships. Also, information about adhesives as bonding materials for body structures and finally the properties of polyurethane adhesives specific to these systems as the main adhesives of LTA systems are reviewed.

Key Words

**lighter than air systems,
airship,
polyurethane adhesive,
multilayer structure,
low temperature adhesive**

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: h.eshaghi@isrc.ac.ir

مقاله مروری

بسپارش
فصلنامه علمی
سال سیزدهم، شماره ۲،
صفحه ۵۷-۴۰، ۱۴۰۲
ISSN: 2252-0449

معرفی کشتی‌های هوایی و چسب‌های پلی‌یورتانی این سامانه‌ها

هاجر اسحاقی [1*]، زینب السادات شیخ‌الاسلامی [2]

۱- شیراز، پژوهشکده مکانیک

۲- تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، صندوق پستی ۱۱۲-۱۴۹۷۵

دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۷، پذیرش: ۱۴۰۱/۴/۵

چکیده

سامانه‌های سبک‌تر از هوا (LTA) به نوع جدیدی از ناوبرهای هوایی اطلاق می‌شود که معمولاً در ارتفاع ۲۰ km از سطح زمین شناور هستند. از آنجا که پایگاه رادیوییِ راه دور، در ارتفاع ۲۰ km تا ۵۰ km از سطح زمین تعریف می‌شود، بنابراین سامانه‌های LTA به‌عنوان مکمل شبکه‌های ارتباط زمینی و ماهواره‌ای مورد توجه قرار گرفته‌اند. امروزه، به کشتی هوایی به‌عنوان یکی از انواع سامانه‌های سبک‌تر از هوا و حاملی برای انسان و اجسام با هزینه کم و حداکثر کارایی بسیار توجه شده است. بدنه این سامانه‌ها از ساختارهای چندلایه پلیمری شامل الیاف، پارچه و لایه‌های فیلم پلیمری تشکیل شده‌اند که از ویژگی‌های نگهداری گازهای سبک (مثل هیدروژن و هلیوم)، مدول کششی زیاد، مقاومت زیاد دربرابر فشار داخلی و خارجی و تحمل تغییرات دمایی زیاد برخوردارند. در این میان، برای اتصال لایه‌ها و استحکام درزگیری آن‌ها از چسب‌های پلیمری کم‌دما، مقاومت کششی زیاد و انعطاف‌پذیری عالی استفاده می‌شود. با وجود مطالعات زیاد درباره این سامانه‌ها، هنوز فرصت‌های بسیاری برای مطالعه در صنعت سامانه‌های سبک‌تر از هوا وجود دارد. بنابراین در مقاله حاضر تلاش شده است تا با معرفی این سامانه‌ها و انواع آن‌ها و شناسایی اجزای تشکیل‌دهنده از طریق معرفی کشتی‌های هوایی، گام مؤثری در ورود به پژوهش و تولید آن‌ها برداشته شود. همچنین، اطلاعاتی درباره چسب‌ها، به‌عنوان مواد اتصال‌دهنده ساختارهای بدنه ارائه شده و درنهایت ویژگی‌های چسب‌های پلی‌یورتانی مختص این سامانه‌ها به‌عنوان چسب‌های اصلی سامانه‌های سبک‌تر از هوا مرور شده است.

هاجر اسحاقی

زینب السادات شیخ‌الاسلامی

واژگان کلیدی

سامانه‌های سبک‌تر از هوا،
کشتی هوایی،
چسب پلی‌یورتانی،
ساختار چندلایه،
چسب کم‌دما

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:
h.eshaghi@isrc.ac.ir

مقدمه

سامانه‌های سبک‌تر از هوا (lighter than air, LTA) آن دسته از وسایل نقلیه با قابلیت پرواز هستند که شناوری آن‌ها در لایه‌های جوی اطراف زمین بسیار مهم است. به‌دلیل وزن کمتر این سامانه‌ها نسبت به هوا، جابه‌جایی آن‌ها بسیار آسان به‌نظر می‌آید. شناوری این دسته از وسایل نقلیه با گازهای سبک‌تر از هوا مانند هیدروژن، هلیوم یا هوای گرم تأمین می‌شود و بدین دلیل نیز با عنوان سبک‌تر از هوا معروف شده‌اند. سامانه‌های نوین LTA در ادامه اولین بالن هوای گرم ساخته شده‌اند که توسط Joseph و Étienne Montgolfier در سال ۱۷۸۳ در فرانسه برای اولین بار اختراع شد [۱].

پیش‌بینی‌های جهانی بر این پایه است که سامانه‌های نوین سبک‌تر از هوا می‌توانند نقشی مشابه با ماهواره‌ها را ایفا کنند. بنابراین در نیم دهه اخیر از نظر تجاری، برای گسترش سامانه‌های LTA، به‌عنوان جایگزین ماهواره‌های گران‌قیمت با اهداف یکسان (ماهواره‌های مدارپایین) تلاش شده است [۱].

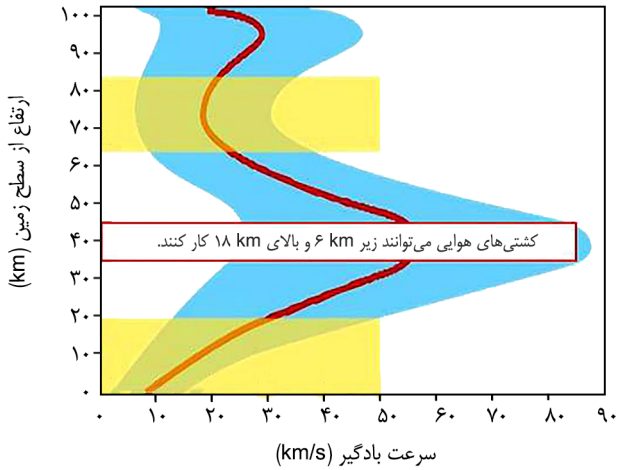
به‌طورکلی، LTAها از مزایای نزدیک‌بودن به زمین به‌منظور کاهش ازدست‌رفتن داده‌های جمع‌آوری‌شده، فاصله‌های کوتاه‌تر انتقال داده‌ها در ارتباط با زمین، کاهش تأخیر انتقال داده‌ها نسبت به ماهواره‌ها و امکان بازگشت به‌منظور تعمیر و نگهداری نسبت به ماهواره‌ها بهره‌مندند. افزون بر این، نظارت مداوم بر یک موقعیت ثابت نیز برای آن‌ها تعریف شده است. بدین معنا که نزدیکی به سطح منطقه زیر پوشش، اجازه تصویربرداری با وضوح بیشتر را فراهم می‌کند. این کاربری برای سامانه‌های سبک‌تر از هوا، برتری آشکار آن‌ها نسبت به ماهواره‌های مدارپایین را نشان می‌دهد. قرارگیری طولانی‌مدت سامانه‌های LTA در یک موقعیت ثابت (در ارتفاع حدود ۲۰ km از سطح زمین) می‌تواند برای اهداف گوناگون بسیار مفید باشد. در این فاصله، LTAها امکان مراقبت‌های ۲۴ h از مرزها، تشخیص نشتی نفتکش‌ها، رصد کشتی‌های دزدان دریایی در اقیانوس، تقویت GPS در مناطق پرتردد، تجزیه و تحلیل فرسایش و نظارت بر تمیزی ساحل‌ها را به‌طور بسیار مفیدی میسر می‌کنند. همچنین، سامانه‌های LTA می‌توانند به‌عنوان گزینه ارزان‌تری برای جایگزینی ماهواره‌ها به‌منظور تجزیه و تحلیل هواشناسی و مدیریت بلایای طبیعی استفاده شوند [۲].

از کاربردهای مهم دیگر LTA، تصویربرداری نوری با وضوح زیاد و زیرقرمز نزدیک بوده که برای کاربردهای نجومی مفید است. سامانه مطمئن LTA شناور در ارتفاع ۲۰ km یا بیشتر، می‌تواند به‌عنوان رصدخانه‌ای برای ارائه تصاویری با کیفیت قابل‌رقابت با تلسکوپ‌های فضایی باشد. از آنجا که زمان پاسخ‌ها کوتاه و هزینه عملیاتی آن بسیار کمتر از یک تلسکوپ فضایی بوده، بنابراین در دهه اخیر، LTAها به‌عنوان جایگزین ماهواره‌ها بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. نکته مهم در جایگزینی ماهواره‌های حامل تلسکوپ‌های فضایی با سامانه‌های LTA این است که ارتفاع از سکوی قرارگیری سامانه LTA، بیش از هوا و جو است، بنابراین اغتشاشات هوایی بر آن اثرگذار نیست و شب‌های آسمانی کاملاً صافی را می‌توان تجربه کرد. تا زمانی که سکو در این ارتفاع باقی بماند، می‌تواند داده‌ها را طی شبانه‌روز با کیفیت عالی جمع‌آوری کند. از این رو، یک رصدخانه نجومی استراتوسفری، می‌تواند پشتیبانی علمی قابل‌قبولی را برای تعداد زیادی از مأموریت‌های فضایی با هزینه‌ای کمتر از ماهواره‌های معمولی مستقر در مدار زمین فراهم کند. در عصر اطلاعات حاضر، تأثیر بزرگ دیگر سامانه‌های LTA، افزایش دسترسی به خدمات اینترنت همراه به‌ویژه تقویت اتصال در مناطق با دسترسی دشوار و تسهیل جهانی‌سازی ارتباطات اینترنتی است [۳].

با توجه به بسیاری از مزایای بالقوه بیان‌شده، جای تعجب نیست که بسیاری از سازمان‌های تجاری و نظامی در سراسر جهان برای ارتقای این سامانه‌ها تلاش می‌کنند [٤]. در حال حاضر، بیش از ۳۰ شرکت علاقه‌مند به توسعه این سامانه‌ها و ایستگاه‌های هوایی در چین، فرانسه، آلمان، هند، ژاپن، کره جنوبی، روسیه، انگلستان و ایالات متحده در حال فعالیت هستند [۳].

گاهی سامانه‌های LTA به‌دلیل قابلیت بالقوه زیاد پوشش‌دهی منطقه به‌عنوان چشمی در آسمان معرفی می‌شوند، زیرا می‌توانند بر رصد الکترونیکی و نوری یک کشور بزرگ به‌طور کامل نظارت کنند. به‌عنوان مثال، سامانه LTA به‌کارگرفته‌شده در تگزاس، مستقر در ارتفاع ۲۱/۳ km از سطح زمین، می‌تواند دیدی به وسعت ۵۲۳ km را شامل شود که تقریباً معادل کل منطقه تگزاس است (شکل ۱) [۱].

شکل ۱- شعاع خط دید یک سامانه LTA [۱].



شکل ۲- نمایی از سرعت باد و تلاطم‌های هوایی برحسب ارتفاع از سطح زمین [۱].

سرعت زیاد باد و تلاطم‌های پیش‌بینی‌ناپذیر در برخی از ارتفاعات در جو، موجب مشکلات زیادی در عملیات کشتی هوایی می‌شود. شکل ۲، نمایه سرعت باد سالانه در ارتفاعات مختلف از سطح زمین را نشان می‌دهد که در آن تغییرات درخور توجه سرعت باد نسبت به ارتفاع از سطح زمین به تصویر درآمده است [۲]. مناطق مطلوب با سرعت باد و تلاطم کم در این منحنی قابل‌شناسایی است. بنابراین به‌منظور عملکرد مناسب‌تر سامانه‌های LTA، بخش خاصی از لایه استراتوسفر (تقریباً زیر ۶ km و بیش از ۱۸ km) که بالای جریان جت یا لایه ترافیک هوایی و زیر لایه‌های فوقانی آن قرار دارد، مناسب‌ترین منطقه محسوب می‌شود. زیرا در آن تلاطم‌های هوایی کمتر بوده و از جو پایدارتری برای قرارگیری این دسته از سامانه‌ها برخوردار است [۱،۳].

دسته‌بندی سامانه‌های LTA

وسایل نقلیه LTA به دو دسته بزرگ شامل سامانه‌های نقلیه بی‌موتور و باموتور دسته‌بندی می‌شوند که در ادامه به شرح آن‌ها پرداخته شده است.

سامانه‌های نقلیه بی‌موتور

سامانه‌های نقلیه بی‌موتور شامل بالن‌های ثابت یا همان هوایستهای (aerostats) دارای اتصال هستند. این اتصالات با یک رابط یا کابل به زمین متصل می‌شوند، درنتیجه ثابت می‌مانند و جابه‌جایی ندارند. آن‌ها در حوزه‌های گسترده‌ای چون بررسی و رصد رویدادهای طبیعی، نظارت و گشت‌زنی‌های حفاظتی، ایجاد برقراری مؤثر در

شکل ۳- هوایست معمولی، سامانه نقلیه بی‌موتور و دارای اتصال [۷].

ارتباطات بدون سیم و نظارت‌های نظامی استفاده می‌شوند [۷-٤]. هوایست‌ها را می‌توان با توجه به کاربرد و ارتفاع قرارگیری آن‌ها به سه دسته تاکتیکی (ارتفاع حدود ۳۰۰ m)، عملیاتی (ارتفاع از ۹۰۰ m تا ۱۵۰۰ m) و راهبردی (ارتفاع حدود ٤/٥ km-۳) طبقه‌بندی کرد [۸]. تصویری از نمای کلی سامانه‌های نقلیه بی‌موتور در شکل ۳ نشان داده شده است.

در سامانه نقلیه بی‌موتور دارای اتصال با ارتفاع زیاد، نیروی لازم برای بالارفتن فقط با گاز بالابر مانند هلیوم یا هیدروژن تأمین می‌شود. این گاز در محفظه (بدنه بالن) ذخیره و نگهداری می‌شود. در این سامانه‌ها، برای نگهداری ایستگاه یا کنترل ارتفاع نیازی به نیرو نیست. همچنین در زمان تعمیر و نگهداری، به‌راحتی قابل‌بازیابی هستند. طبق گزارش سال ۲۰۰۵ در آن زمان با توجه به وزن کابل اتصال، ارتفاع هوایست حداکثر به ۵ km محدود شده بود. اما پیش‌بینی می‌شود، با توجه به اهمیت این سامانه‌ها و سرمایه‌گذاری در فناوری نانو، صنعتگران این عرصه با استفاده از مواد کارا بتوانند اتصالات بسیار سبک‌وزن با استحکام زیاد را برای نگه‌داشتن هوایست‌ها در ارتفاعات بیش از ۱۸ km فراهم کنند. هرچند به‌نظر می‌رسد، طول کابل‌های اتصال به سامانه، مشکلی ایجاد نمی‌کند، اما به‌دلیل موقعیت ثابت زمین، هوایست‌ها هنوز تا حدودی محدودند [۹].

وسایل نقلیه باموتور

وسایل نقلیه باموتور، جزء آن دسته از سامانه‌های نقلیه‌ای هستند که قابلیت جابه‌جایی و حمل انسان یا کالا را دارند. محفظه این نوع سامانه‌ها با گازهای سبک‌تر از هوا پر شده‌اند. این مجموعه

شکل ٤- کشتی هوایی معمولی دارای گوندولا، وسیله نقلیه باموتور و بدون اتصال [۱۱].

از وسایل نقلیه شامل دو دسته اصلی، کشتی‌های هوایی معمولی یا کوچک به نام blimp و کشتی‌های هوایی هیبریدی هستند. تفاوت اصلی بین کشتی‌های هوایی معمولی و هیبریدی در نوع بالابر مورد نیاز برای پرواز است. در Blimpها فقط گاز بالابر نیروی لازم برای بلندشدن را فراهم می‌کند. اما در کشتی‌های هوایی هیبریدی، گاز بالابر در کنار یک بالابر دینامیکی که دارای آثار آیرودینامیکی است، نیروی لازم برای بلندشدن را فراهم می‌کند [۱۰].

این دسته از سامانه‌های LTA متشکل از یک بدنه (بزرگ‌ترین بخش که در آن گاز سبک‌تر از هوا پر می‌شود)، یک بالونت (ballonet) (بخشی که با هوا پرشده و در فشاری نگه داشته می‌شود که بتواند فشار داخل بدنه و شکل آیرودینامیک سامانه را تنظیم کند) و باله‌ها (بخش متعادل‌سازی آیرودینامیکی) هستند. چنانچه برای حمل‌ونقل و جابه‌جایی مسافر از این سامانه‌ها استفاده شود، به بخش اضافی به نام گوندولا (gondola) (بخش خارجی یا محفظه مسافری متصل به کشتی هوایی) نیز مجهز می‌شوند [۷]. در شکل ٤، تصویری از یک کشتی هوایی معمولی دارای گوندولا نشان داده شده است.

کشتی‌های هوایی

کشتی هوایی استراتوسفری (stratospheric airship, SSA) نوعی وسیله نقلیه باموتور و بی‌سرنشین، خودران و آزاد در ارتفاع زیاد است که بالابری آن با ترکیبی از آیرودینامیک و گاز بالابر موجود در بدنه انجام می‌شود. ترکیبی از سامانه‌های ذخیره انرژی پیشرفته و فتوولتایی (تبدیل مستقیم انرژی نوری به انرژی الکتریکی بدون استفاده از سازوکارهای محرک مکانیکی با سلول‌های خورشیدی) نیروی لازم برای انجام مأموریت ویژه هوابرد را تأمین می‌کند. به‌طور کلی برای انجام مأموریت‌های متنوع، کشتی‌های هوایی قابلیت بالقوه بیشتری از هواایست‌ها دارند. بنابراین، اکثر پژوهش‌ها به‌دنبال توسعه کشتی‌های هوایی هستند. یک کشتی هوایی مجهز به سامانه ذخیره انرژی کارآمد، نه‌تنها می‌تواند ایستگاه در موقعیت جغرافیایی خاص را حفظ کند، بلکه می‌تواند به موقعیت مکانی جدیدی برود و جهت بدنه را متناسب با آن تنظیم کند. این ویژگی‌ها موجب می‌شوند تا این دسته از وسایل نامزدهای فوق‌العاده‌ای برای مأموریت‌های نظارتی بلندمدت در ارتفاع زیاد باشند [۹].

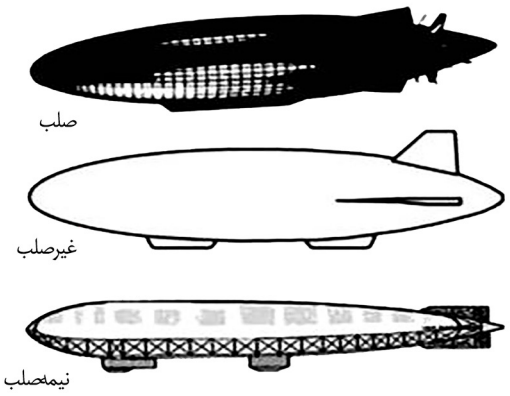
در دهه‌های گذشته، با وجود تلاش‌ها و هزینه‌های درخور توجهی که صرف شده، هیچ کشتی هوایی خودرانی بیش از یک روز در ارتفاع استراتوسفری پرواز نکرده است. اولین پرواز موفقیت‌آمیز کشتی هوایی موتوردار در استراتوسفر در اواخر دهه ۱۹٦۰ انجام شد که به‌مدت ۲ h با ۲ kg بار به ارتفاع ۲۰/٤ km رسید [۱۲]. در سال ۲۰۰۵، صنایع Rion پرواز تاریخی ۸ h یک کشتی هوایی استراتوسفری قدرتمند را اعلام کرد که به ارتفاع ۲۰ km رسیده بود. این اتفاق هنوز هم یکی از رکوردهای جهانی برای طول پرواز کشتی هوایی با ارتفاع زیاد به‌شمار می‌آید [۱۳]. در عین حال، این نتیجه پیشرفت مهمی در مهندسی نساجی (الیاف کارا و لایه‌های پلیمری فیلمی) به‌حساب آمد. با وجود این، هنوز علاقه‌مندان این حوزه به گسترش مرزها در طراحی و توسعه کشتی هوایی ادامه می‌دهند [۲].

براساس تحلیل یکی از معدود مقالات مروری در این زمینه که در سال ۲۰۰۹ منتشر شده است، آمریکا، ایتالیا، انگلیس و ژاپن کشورهایی هستند که بیشترین مقاله را درباره وسایل نقلیه موتوردار منتشر کرده‌اند. البته براساس مقالات موجود، در سال‌های اخیر چین هم بدین رقابت پیوسته است و از دسامبر ۲۰۱۵، با تأکید بسیار بر کشتی‌های هوایی به‌سرعت به تولیدکننده عمده مقالات علمی در منطقه تبدیل شده است [۱٤].

دسته‌بندی کشتی‌های هوایی

کشتی‌های هوایی را می‌توان براساس ساخت (کشتی هوایی صلب، نیمه‌صلب و غیرصلب)، نحوه تولید نیروی عمودی (سبک‌تر از هوا، سنگین‌تر از هوا و هیبریدی) و قابلیت ترابری (باربری سنگین و متوسط) دسته‌بندی کرد [۱۵]. تقسیم‌بندی متداول در صنعت کشتی هوایی، از منظر ساخت است. در ادامه، شرح مختصری از این نوع تقسیم‌بندی ارائه می‌شود که در شکل ۵ نیز نمایی از انواع آن ترسیم شده است.

کشتی‌های هوایی صلب: این نوع کشتی‌ها دارای چهارچوب



شکل ۵- انواع کشتی‌های هوایی [۳].

ساختاری مستحکم بیرونی هستند که به حفظ شکل آن‌ها کمک شایانی می‌کند. البته گاز بالابر موجود در یک یا چند محفظه گاز داخلی در تثبیت و حفظ شکل کشتی تأثیر بسیاری دارد. کشتی‌های هوایی صلب، Zeppelin نیز نامیده می‌شوند، زیرا اولین بار توسط Ferdinand von Zeppelin به پرواز درآمدند که پیشگام توسعه کشتی‌های هوایی صلب در قرن بیستم است [۱۶].

کشتی‌های هوایی نیمه‌صلب: همان‌طور که از اسم آن‌ها مشخص است شکل آن‌ها در کنار نوعی ساختار معین با حفظ فشار داخلی، حفظ می‌شود [۱۶].

کشتی‌های هوایی غیرصلب: معمولاً Blimp نامیده می‌شوند. اختلاف فشار درون کشتی هوایی و بیرون آن (جو یا محیط بیرونی) موجب حفظ شکل آن‌ها می‌شود. این نوع از کشتی‌های هوایی دارای بالن‌های کوچک محتوی هوا به نام بالونت هستند [۱۶].

بالن‌ها با گاز سبک‌تر از هوا پر می‌شوند. به‌هنگام اوج‌گیری و افزایش ارتفاع، گاز بالابر منبسط می‌شود و زمانی که کشتی هوایی باید به زمین برگردد، روند معکوس در بالن‌ها رخ می‌دهد. حمل بار نقلیه قدیمی‌تر معمولاً کمتر از ۳۰ t است، در حالی که حمل بار سامانه نقلیه هوایی جدیدتر با باربری سنگین می‌تواند به ۵۰۰ t هم برسد [۱۵،۱۶].

براساس مستندات، دستیابی به کشتی هوایی با بدنه غیرصلب آسان است. زیرا که عملاً کشتی‌های هوایی غیرصلب ساختارهای ساده‌ای دارند؛ طراحی، ساخت و نگهداری آسان‌تری داشته، هزینه ساخت کمتر و چرخه زمان تولید کوتاه‌تری دارند. یادآوری می‌شود در این نوع از کشتی‌ها، بالونت‌ها به‌منظور ثابت نگه‌داشتن فشار داخلی به‌کارگرفته می‌شوند که این مسئله با حفظ دمای گاز بالابر یا ثابت نگه‌داشتن ارتفاع کشتی هوایی ممکن می‌شود. تنظیم حجم هوا در بالن‌ها و حجم گاز در پوشش کشتی هوایی باعث ایجاد تغییر در شناوری آن‌ها می‌شود [۱۷].

برای کشتی‌های هوایی غیرصلب، بدنه یکی از عناصر اصلی سازه محسوب می‌شود. این قسمت حاوی گاز بالابر است که شکل آیرودینامیکی کشتی هوایی را حفظ می‌کند. بنابراین لازم است، مهندسی و کنترل کیفیت این قسمت از کشتی هوایی در سطح بالایی باشد [۱۸]. اگرچه در سه دهه گذشته پیشرفت‌های چشمگیری در فناوری سامانه‌های سبک هوابرد حاصل شده است، اما SSAها الزامات منحصر به فرد خود را دارند که بهبود بیشتری می‌طلبند. یکی از چالش‌های اصلی، توسعه ماده‌ای بسیار سبک‌وزن و در عین حال مستحکم است که با وجود حمل گاز بالابرنده، مقاومت زیادی دربرابر محیط جو داشته باشد [۳].

الزامات مهم صنعت کشتی هوایی

یک SSA مطلوب برای ارائه خدمات ارزشمند باید بتواند برای چند ماه تا چند سال در ارتفاع زیاد، پایدار بماند. درنتیجه، پارامترهای گوناگونی باید در آن لحاظ شود. به‌عنوان مثال، مورد بسیار چالش برانگیز، نشت گاز بالابرنده از طریق بدنه یا محل‌های اتصال است که باید به‌حداقل برسد. گاز تک‌اتمی هلیوم با کمترین قطر مولکولی از میان تمام گازهای بالابرنده مؤثر، قابلیت ایجاد شناوری درخور توجهی در این سامانه‌ها دارد. اما، به‌دلیل کوچک‌بودن قطر مولکول هلیوم به‌راحتی نمی‌توان از نشت آن به‌طور کامل جلوگیری کرد. هلیوم به‌مرور از طریق مواد پوششی، حتی پوشش‌های لایه‌دارشده با آلیاژ آلومینیم از محل اتصالات پوشش نشت پیدا می‌کند [۱۹]. به‌طور قطع، اتلاف گاز بالابرنده به ازدست‌رفتن قابلیت عملیاتی و درنهایت افزایش هزینه آن منجر می‌شود [۲۰].

پارامتر دیگری که مهم تلقی می‌شود، انعطاف‌پذیری کافی بافت بدنه کشتی هوایی برای انبساط و انقباض در طول چرخه عمر کاربری آن‌هاست. زیرا، تغییرات دمای روزانه می‌تواند موجب افزایش و کاهش فشار گاز داخلی کشتی هوایی شود. درنتیجه بدنه، به‌دلیل تنش‌های زیاد ناشی از تغییرات فشار به بافت آن، نیازمند استفاده از پوشش‌های با انعطاف‌پذیری لازم است. در حالی که تغییرات دمایی، به‌ویژه دمای بسیار کم می‌تواند موجب شکننده‌شدن مواد و ازدست‌رفتن انعطاف‌پذیری پوشش و اتصالات آن شود [۲۰].

مقاومت زیاد دربرابر پارگی نیز از دیگر پارامترهای مهم پوشش SSAها به‌ویژه اتصالات آن‌ها به‌منظور به حداکثررساندن تحمل آسیب و جلوگیری از گسترش فاجعه‌بار پارگی شناخته شده است [۲۰].

جدول ۱- ملاحظات طراحی مواد استفاده‌شده در کشتی هوایی [۳].

الزامات	شاخص
ساختاری	استحکام‌های کششی و برشی، مقاومت پارگی و نسبت استحکام به وزن
سامانه	عمر سرویس‌دهی، مقاومت محیطی (UV، ازون، دما و غیره) و نفوذپذیری گاز بالابرنده
کارایی مواد	اتصال خم‌شو (متأثر از تاشدن نباشد)، اتصال قابل‌بلوکه‌شدن و اتصال بین‌لایه‌ای
قابلیت تولید مواد	کنترل فرایند تکرارپذیر (ثبات) و درصد بازدهی
قابلیت ساخت پوشش	قابلیت اتصال و جابه‌جایی
کنترل گرمایی	قابلیت جذب نور خورشید و انتشار زیرقرمز

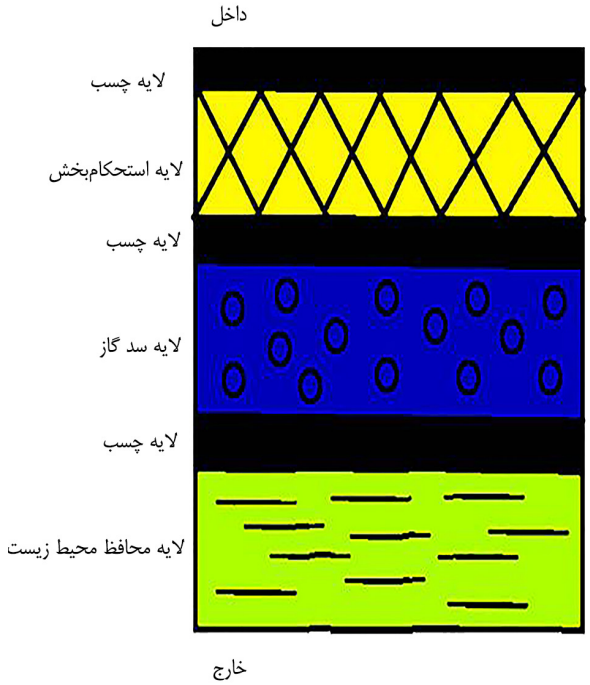
خزش کم، به‌طوری که شکل پوشش و ثبات ابعادی بدنه را در طول عمر SSAها تحت تأثیر قرار دهد، نیز می‌تواند مهم و حیاتی به‌شمار آید. از این رو لازم است، برای اتصالات بدنه مواردی اعمال شود که بتوانند درزهای محکم و قابل‌اعتمادی را برای مقاومت دربرابر گسستگی و خزش ایجاد کنند. در جدول ۱، ملاحظات کلی طراحی یک ماده پوششی درج شده است [۲۰].

در کنار طراحی محفظه سامانه‌های SSA، بافت بدنه، نحوه اتصالات و چسب‌های به‌کارگرفته‌شده نیز باید دارای الزامات پیش‌گفته باشند. با توجه به الزامات مهم بیان‌شده، برخی ویژگی‌های مواد به‌کاررفته در پوشش بدنه و چسب‌های این سامانه‌ها به شرح زیر است [۸،۲۰،۲۱]:

- باید از وزن کمی برخوردار باشند تا کارایی و ظرفیت بار سامانه را بهبود بخشند.
- باید استحکام خوبی داشته باشند تا بتوانند بر فشارهای مختلف واردشده به سازه، غلبه کنند. یادآور می‌شود، نسبت استحکام به وزن نکته مهمی در تعیین اندازه هواایست‌ها یا کشتی‌های هوایی است.
- این مواد باید از پایداری گرمایی خوبی برخوردار باشند. به‌طور ویژه، باید ضریب انبساط گرمایی کمی داشته باشند تا بتوانند تغییرات دمایی روزانه را تحمل کنند و در اثر این تغییرات، تنش‌های گرمایی در زمینه آن‌ها افزایش نیابد.
- نفوذپذیری گاز در مواد باید بسیار کم باشد تا از سقوط سامانه در طول پرواز جلوگیری شود. بدین وسیله با سوخت‌گیری کمتر و زمان کارکرد بیشتر، هزینه کارکرد به‌طور درخور توجهی کاهش می‌یابد.
- مواد باید مقاومت پارگی بسیار زیادی داشته باشند.
- مواد باید از مقاومت به خزش خوبی نیز برخوردار باشند تا بر چرخه‌های متعدد انبساط و انقباضی که در طول عمر سامانه به آن‌ها تحمیل می‌شود، غلبه کرده و از سقوط جلوگیری کنند.
- باید دربرابر شرایط سخت محیطی مقاوم باشند [۸،۲۰،۲۱].

پرواضح است که تمام این الزامات با یک نوع ماده، تحقق‌پذیر نیستند. برای تأمین تمام این الزامات چالش برانگیز در کنار طراحی SSA، معمولاً به‌کارگیری مواد کامپوزیتی انعطاف‌پذیر چندلایه به‌عنوان رویکردی مؤثر درنظرگرفته می‌شود. نمونه‌های اخیر کشتی‌های هوایی، شامل ساختارهای چندلایه هستند که به‌طور معمول از پلیمرها، الیاف، منسوجات و ماتریس‌های فیلم کارا و مواد اتصال‌دهنده مناسب تشکیل می‌شوند. در ساختار این چندلایه‌ها از منسوجات با مقاومت‌های زیاد، الیاف با عملکرد متفاوت (به‌عنوان مثال Zylon و Vectran) و فیلم‌هایی با استاندارد مخصوص (برای مثال، Mylar و Kapton) استفاده می‌شود [۱]. ویژگی مواد چندلایه این است که می‌توان با انتخاب محتاطانه اجزای مناسب، خواص کلی آن‌ها را تنظیم و بهینه کرد. برای مواد پوشش SSA، چندلایه باید طوری ساخته شود که تعادل حاصل بین نسبت قدرت به وزن، مقاومت دربرابر پارگی، احتباس گاز، مقاومت دربرابر ازون و تابش فرابنفش، انعطاف‌پذیری و پایداری سرویس بهینه شوند. از این رو، چندلایه از ترکیباتی با قابلیت تحمل بار، لایه‌های سدگر نفوذ گاز و محافظ دربرابر تغییرات آب و هوا و محیط تشکیل شده است. افزون بر این، اجزای آن باید به‌طور مؤثر با چسبی مطابق با این الزامات به‌هم متصل شوند تا امکان ساخت راحت‌تر چندلایه و اتصال مواد را فراهم کنند [۱۹]. پیکربندی چندلایه‌های متداول در شکل ٦ نشان داده شده است.

این ساختار به‌طور معمول دارای دو طرف داخلی و خارجی با مشخصات متفاوت و مکمل است. بدین صورت که لایه نگهدارنده گاز، بین لایه محافظ دربرابر هوا و لایه تحمل‌کننده گاز و بار گنجانده شده است. لایه بیرونی برای قرارگیری در معرض آب و هوا، تابش فرابنفش و ازون طراحی می‌شود و کار اصلی آن محافظت



شکل ٦- پیکربندی چندلایه متداول [٣].

از تخریب محیطی لایه‌های داخلی است. لایه داخلی معمولاً در تماس مستقیم با گازهای سبک‌تر (هیدروژن-هلیوم) قرار می‌گیرد و فشار زیادی را تحمل می‌کند. در این ساختار، اتصال بخش‌های مختلف بسیار مهم است [٧،١٩]. لایه‌ها با اعمال فشار در دمای کنترل‌شده با استفاده از چسب‌هایی به‌هم فشرده می‌شوند که اغلب برپایه پلی‌یورتان بوده و دارای مقاومت کششی و انعطاف‌پذیری زیاد در دمای کم هستند. با این حال، هنوز جای کار زیادی برای پیشرفت و اصلاح ساختارهای بدنه SSA و اتصالات آن‌ها وجود دارد [١].

پیش از پیشرفت در زمینه تولید الیاف کارا و به‌کارگیری فیلم‌های پلیمری، چسب‌ها هدف اصلی در اصلاح لایه‌ها محسوب می‌شدند تا ویژگی‌های مطلوب عملکردی را برای ساختار چندلایه فراهم آورند. بنابراین، بسیاری از مواد افزودنی از جمله مهارکننده‌های UV، عوامل ضدقارچ، تقویت‌کننده‌های چسبندگی، رنگ‌دانه‌ها و موارد مشابه در فرمول‌بندی چسب اضافه می‌شدند تا بتوان به ویژگی‌های عملکردی مدنظر برای چندلایه دست یافت [١٩].

چسب‌ها در سامانه‌های سبک‌تر از هوا برای اتصال لایه‌های مختلف در کنار بافت اصلی کاربرد زیادی دارند. آن‌ها باید از قابلیت چسبندگی عالی برخوردار باشند تا از جداشدن لایه‌ها جلوگیری شود. گفتنی است، مواد اتصال‌دهنده افزون بر داشتن بسیاری از ویژگی‌های برشمرده برای بافت بدنه، باید دارای طول عمر زیادی نیز باشند [١٩].

در راستای ارزیابی مناسب‌بودن مواد به‌کاررفته در بدنه و اتصالات وسیله نقلیه SSA، آزمایش‌های عملکردی شامل تعیین مشخصات فیزیکی و مکانیکی، مناسبت گرمایی، ظرفیت تحمل بار، پاسخ به اختلالات الکترومغناطیسی، مطالعات شوک و لرزش انجام می‌شود [١٩].

اتصالات در سامانه‌های SSA

فناوری اتصال به اندازه توسعه مواد پایه پوشش بدنه در سامانه‌های SSA دارای اهمیت است. از آنجا که ماده پایه بارها را تحمل می‌کند، درز بین قطعه‌های مختلف بدنه نیز باید بتواند نیروی حاصل از این بارها را از یک قسمت بدنه به قسمت دیگر آن منتقل کند. این انتقال بار باعث ایجاد نیروهای کششی و برشی روی درز می‌شود. درنتیجه، مهم است که خواص کششی درز برابر یا بیش از مقاومت خود ماده پایه بدنه باشد تا از یک‌پارچگی کل ساختار بدنه و حداکثر کارایی ساختاری اطمینان حاصل شود. از لحاظ نحوه اتصال، بسته به نوع درز و قطعه، از دستگاه‌ها و روش‌های متفاوتی به شرح زیر به‌منظور ایجاد نوعی دوخت و برقراری اتصال بین قطعات در ساختار بدنه کشتی هوایی استفاده می‌شود [٢٠]:

- جوشکاری فراصوت برای ایجاد دوخت در قطعات گرمانرم که به روش جوش مداوم یا ایستا عمل می‌کند. مواد به‌طور پیوسته با مجموعه‌ای از غلتک‌ها به داخل دستگاه هدایت می‌شوند و در حالی که زیر فشارند، گرم شده و در معرض ارتعاشات فراصوت قرار می‌گیرند.
- جوشکاری بسامد رادیویی (RF) که معمولاً برای تولید جوش‌های ایستا و نیمه‌پیوسته در قطعات گرمانرم طراحی شده‌اند.
- جوشکاری گرمایی با استفاده از منبع گرما و فشار خارجی که به‌کمک آن مواد گرمانرم را درزگیری می‌کنند. سه نوع جوشکاری گرمایی متفاوت با عنوان جوشکاری ضربه‌ای، قلم گرم و هوای گرم، بسته به هدف مدنظر وجود دارد. هر سه امکان به‌کارگرفته‌شدن در دو حالت طراحی ایستا و پویا را دارند، اما جوشکاری ضربه‌ای بسیار موفقیت‌آمیزتر بوده است.
- ایجاد اتصالات مکانیکی، شامل دوخت با نوار درزگیر، بست و گیره است.
- ایجاد اتصالات چسبی با استفاده از چسب‌های ساختاری مانند پلی‌یورتان، اپوکسی، آکریلیک و غیره روی سطوح اتصال که با یا بدون اعمال فشار، اعمال می‌شوند [٢٠].

با توجه به مجموعه فشارهای واردشده بر درزها، اصولاً از یک یا چند اتصال‌دهنده معرفی‌شده با استحکام متوسط (حداکثر ٧٠٠ lb/in^2)

به‌طور هم‌زمان استفاده می‌شود. طراحی و توسعه یک سامانه درزگیری (طراحی درز و فناوری درزگیری) با مقاومت زیاد در سامانه‌های SSA بسیار مورد توجه است. محیط کم‌دما و چرخه گرمایی متعدد واردشده بر این سامانه‌ها طی شبانه‌روز، فشار درخور توجهی را به یک‌پارچگی و دوام درز تحمیل می‌کند. بنابراین، درز باید قابلیت جذب تنش‌ها را در محدوده دمای سرویس‌دهی داشته باشد، پس نیازمند انرژی شکست زیادی است. از عوامل مهم در هر یک از این پارامترها، خواص توده پلیمری چسب است. مجموعه مستندات نشان می‌دهند، از دیگر چالش‌های اساسی بدنه کشتی‌های هوایی، طراحی، توسعه و به‌کارگیری فناوری‌های نوین در درزگیری قطعات این سامانه‌ها بوده که اخیراً بسیار مورد توجه قرارگرفته است [۲۰].

چسب‌ها در سامانه‌های SSA

در مواد کامپوزیتی چندلایه به‌کارگیری چسب‌ها به‌منظور اتصال لایه‌های مختلف به یکدیگر بسیار مورد توجه است. مهم است که برای به‌حداقل‌رساندن وزن کامپوزیت، از لایه نازک چسب استفاده شود. انعطاف‌پذیری و اتصال‌پذیری مناسب چسب‌ها به هر یک از اجزای سازنده (برای جلوگیری از جداشدن چندلایه) از ملزومات اساسی آن‌ها محسوب می‌شود. لایه‌های چسب میانی می‌توانند از نوع گرمانرم یا گرماسخت باشند. همان‌طور که در بالا بیان شد، اگر از فناوری جوشکاری استفاده شود، لایه داخلی باید گرمانرم باشد. گفتنی است، گاهی دو فناوری در کنار هم استفاده می‌شود [۲۰].

از آنجا که چسب، عامل اتصال و نگه‌داشتن لایه‌های درونی چندلایه و درواقع عامل ساخت اتصالات است، امروزه توجه بسیاری به تولید چسب‌ها و ایجاد اتصالات قابل‌اعتماد و درزهای مستحکم شده است [۱۹]. چسب‌ها، نسبت به سامانه‌های رزینی پایه استفاده‌شده در پوشش، سخت‌تر و شکل‌پذیرتر هستند و اتصالات اصلی به‌وسیله آن‌ها محکم‌تر می‌شود. چسب‌ها برای ساخت چندلایه نیاز به حلال‌های بسیار قوی دارند. خواص چسب به‌طور عمده به‌وسیله خواص پلیمر انتخاب‌شده کنترل و گاهی از عوامل مختلف مانند نرم‌کننده‌ها و پرکننده‌ها برای اصلاح خواص چسب استفاده می‌شود. افزون بر انتخاب چسب، آماده‌سازی سطح بستر و روش مناسب اعمال چسب، از معیارهای کلیدی در دستیابی به ماده کاملاً مهندسی‌شده هستند که به‌طور درخور توجهی بر وزن قطعه نهایی و انعطاف‌پذیری آن، استحکام اتصالات و سایر خواص فیزیکی اثر می‌گذارند [۳،۲۰].

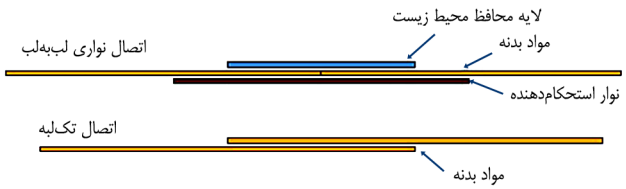
انواع روش‌های به‌کارگیری چسب‌ها

درزگیری قطعه‌های بدنه

برای ساخت بدنه کشتی هوایی با توجه به شکل بدنه، تهیه پوشش یک‌پارچه امکان‌پذیر نیست. بنابراین، پوشش بدنه در قطعه‌های متفاوت تهیه و سپس به‌منظور شکل‌گیری نهایی، قطعات به یکدیگر متصل می‌شوند. بنابراین، به هنگام جابه‌جایی محموله در سامانه‌های SSA، اگر چه بدنه اصلی کشتی بار اصلی را تحمل می‌کند، اما درزهای اتصال بدنه هم باید بتوانند به‌طور مؤثر و کارآمد بار را از یک قطعه به قطعه دیگر انتقال دهند. روند انتقال بار به‌طور حتم موجب ایجاد نیروهای کششی و همچنین برشی در مناطق درزدار می‌شود. بنابراین، چسب‌های محل درزها باید بتوانند نیروی کششی مساوی یا بیش از نیروی کششی پوشش بدنه فراهم آورند، به‌طوری که یک‌پارچگی کل ساختار بدنه حفظ شود [۲۰]. بنابراین، طراحی درزگیری به‌اندازه طراحی و توسعه مواد پوشش مهم تلقی می‌شود. از لحاظ نحوه اتصال، درزهای انتهایی لب به لب و درزهای لبه دو نوع طراحی متداول در سامانه‌های SSA محسوب می‌شوند. هردو نوع درز در شکل ۷ نشان داده شده است.

در اتصال نواری لب به لب، دو قطعه پوشش از ناحیه لبه‌ها به‌شکل درز به درز به یکدیگر متصل می‌شوند و نوار باریکی به‌منظور استحکام‌دهی به‌عنوان نوار ساختاری، زیر لبه درزها را پوشش می‌دهد. برای اطمینان از اتصال مناسب، درز چند بار تحت فشار، گرم و سرد می‌شود. این بند کمک می‌کند تا بار از طریق درز منتقل و پخش شود [۱۹]. جهت دیگر درزهای انتهایی معمولی با نوار بیرونی مقاوم دربرابر آب، هوا و شرایط محیطی پوشیده می‌شود تا درز را به‌طور کامل دربرابر شرایط محیطی محافظت و مشخصه ممانعت از خروج گاز را به‌کل ساختار درز اضافه کند. نوار استحکام‌دهنده که به‌عنوان بند انتهایی استفاده می‌شود، به‌طور خاصی بافته می‌شود، به‌طوری که در جهت عرضی قدرت کشیدگی زیادی داشته باشد و قطعاً با عامل اتصال، پیوستگی مناسبی داشته باشد [۱].

در مقایسه با اتصال نواری لب به لب، اتصال تک‌لبه دارای طراحی بسیار ساده‌تری است که راحتی درخور توجهی در تولید درزگیر



شکل ۷- طراحی درزگیری معمولی مواد بدنه کشتی هوایی [۱،۱۹].

صنعتی واقعی را فراهم می‌کند. در این روش، اتصالات قابلیت انتقال بار تحمیلی به قطعه دیگر را دارند و به‌دلیل پوشانندگی کافی، مانع از نفوذ گاز نیز می‌شوند. با وجود آسانی مسیر تولید و قابلیت زیاد کارکردی، برای این‌گونه درزها محدودیت بزرگی وجود دارد، چرا که لازم است مواد پایه چندلایه از نظر ساختاری از هر دو طرف قابلیت اتصال داشته باشند [۲۰].

با توجه به شرایط سخت محیط عملیاتی سامانه‌های SSA از جمله دمای سرمایش و چرخه گرمایی، یک‌پارچگی درزها افزون بر نیاز به استحکام آن‌ها، حیاتی به‌نظر می‌رسد. به‌طوری که در تغییرات دمایی شدید در طول یک روز، درز باید فشارها را جذب کرده و دربرابر تغییر شرایط، مقاومت زیادی دربرابر جدایش نشان دهد. عامل عمده‌ای که عملکرد درز را تعیین می‌کند، خواص پلیمری چسب است [۲۰].

چندلایه‌سازی پوشش بدنه

در پوشش بدنه کشتی‌های هوایی بیشتر از بافت‌های روکش‌داری استفاده می‌شود که طی فرایند پوشش یافته‌اند. به‌منظور دستیابی به خواص گوناگون در پوشش‌ها و جمع چند خاصیت به‌طور هم‌زمان، ممکن است یک یا چند لایه با ویژگی‌های متفاوت روی سطح بستر اصلی که اصولاً از جنس پارچه است، روکش داده شود. اکثر مواد ویژه روکش، ترکیبات پلیمری مایعی هستند که دارای خاصیت احتباس گاز و مقاومت دربرابر فرسایش بر اثر هوا هستند. با تحول در الزامات پوشش‌های کشتی‌های هوایی، بافت‌های روکش‌دار به‌تدریج با ساختارهای چندلایه انعطاف‌پذیر جایگزین شدند. در این ساختارها، بافت‌ها و فیلم‌های پلیمری چندکاره با استفاده از چسب‌ها به یکدیگر متصل می‌شوند [۱]. از چسب‌ها به‌طور هم‌زمان به‌منظور افزایش خواص پوشش و ایجاد اتصال میان لایه‌های مختلف استفاده می‌شود. چسب‌های میانی بسته به نوع کاربری می‌توانند گرمانرم یا گرماسخت باشند.

به‌منظور به‌حداقل‌رساندن وزن سازه‌ها، به‌کارگیری یک لایه نازک از چسب، حیاتی است. انعطاف‌پذیری کافی و قابلیت چسبندگی مناسب لایه‌ها از دیگر الزامات اساسی چسب‌هاست. افزون بر ویژگی‌های عمده چسب انتخاب‌شده، شرایط سطح بستر، رفتارهای فیزیکی و شیمیایی و روش اعمال نیز به‌طور درخور توجهی بر وزن، انعطاف‌پذیری، پیوند سطحی و سایر خواص فیزیکی محصول نهایی اثر می‌گذارند. همه موارد گفته‌شده جزء عوامل کلیدی برای دستیابی به نوعی پوشش چندلایه کاملاً مهندسی‌شده با قابلیت کاربرد در سامانه‌های SSA محسوب می‌شوند [۱].

انواع چسب های به‌کاررفته در سامانه‌های SSA

از مزایای چسب‌های پلیمری و دلیل علاقه پژوهشگران به استفاده از آن‌ها در سامانه‌های SSA، به‌تأخیرانداختن خرابی‌های سامانمند و به تبع آن کاهش خرابی‌های ناگهانی و تصادف با سایر وسایل نقلیه هوایی است. در این راستا، افزایش مدت زمان کارایی چسب‌ها و بهبود خواص همواره برای پژوهشگران اهمیت داشته است. این مسئله به‌طور قطع با طراحی درست فرمول‌بندی و انتخاب مواد میسر می‌شود. بدین منظور، در کنار انتخاب مواد اولیه، مواد افزودنی مناسب نظیر نرم‌کننده‌ها یا تقویت‌کننده‌ها برای دستیابی به خواص مدنظر در چسب‌ها پیشنهاد می‌شود. البته اصلاح و آماده‌سازی سطح بستر و نحوه فرایند چسب نیز می‌تواند بر وزن، انعطاف‌پذیری، استحکام چسبندگی و سایر خواص فیزیکی آن اثرگذار باشد [۳].

از دیگر نکته‌های مورد توجه پژوهشگران، شرایط جوی مانند دمای سرمایش و چرخه گرمایی است که اثرهای مهمی بر یک‌پارچگی چسب‌ها و فرایند اعمال آن‌ها در درزهای لایه‌های پوشش دارند. بر این اساس، چسب به‌کاررفته باید تحمل جذب تنش و مقاومت دربرابر شکست زیادی داشته باشد. بنابراین، محدوده دمای سرویس‌دهی در طول یک روز عامل مهمی در انتخاب چسب است. در چسب‌های پلیمری، محدوده دمای انتقال شیشه‌ای (T_g) نشانگر رفتار چسب در دماهای متفاوت است. به‌طور کلی، مقاومت دربرابر کشش و مدول کشسانی چسب پلیمری در زیر دمای T_g افزایش می‌یابد، در حالی که انعطاف‌پذیری، مقاومت و چسبندگی سطحی کاهش پیدا می‌کند. بنابراین، رابطه بین T_g و محدودیت‌های دمای سرویس‌دهی، عامل مهمی در پیش‌بینی الزامات خواص چسب‌های پلیمری است [۲۲]. به‌طور کلی، پلیمرهای با T_g خیلی کم، دربرابر دمای سرمایش که بیشترین چالش‌ها را سبب می‌شود، مقاوم‌تر هستند [۲۳].

برای SSA، از میان نامزدهای مختلف از نظر محدوده دمای عملکردی، چسب‌های پلی‌یورتانی در مقایسه با سایر چسب‌های موجود در بازار، دارای ویژگی‌های برجسته‌تری در دمای کم هستند. از سوی دیگر، تهیه چسب‌های پلی‌یورتانی آسان‌تر است و این چسب‌ها قابلیت اتصال خوب به مجموعه متنوعی از بسترها را دارند. البته برخی از انواع پلی‌یورتان‌ها می‌توانند به‌عنوان ماده سدگر گاز مناسب برای جلوگیری از نشت هلیوم نیز معرفی شوند [۲۳].

در درجه دوم، چسب‌های سیلیکونی عملکرد پیوسته خوبی را در گستره دمایی وسیعی، از دمای سرمایش تا ۲۵۰ °C نشان می‌دهند. لاستیک سیلیکونی دارای بهترین انعطاف‌پذیری در دمای کم در

میان تمام مواد پلیمری است. با این حال، نفوذپذیری زیاد گاز، چقرمگی کم و مقاومت دربرابر سایش آن مشکل‌ساز است. به‌طور کلی، درزهای پوشش‌یافته با الاستومرهای سیلیکونی زمانی عملکرد عالی نشان می‌دهند که مقاومت دربرابر ورآمدگی بیش از کشش یا برش باشد. با این حال، اکثر چسب‌های پایه‌سیلیکونی به‌طور طبیعی خاصیت سدگری گاز کمی دارند [۲۴].

در درجه سوم، چسب‌های پایه‌لاستیکی، مانند لاستیک‌های بوتیل، نئوپرن و پلی‌سولفید، خواص مفیدی را در دمای کم ارائه می‌دهند. این چسب‌ها به‌طور معمول انعطاف‌پذیری خود را در گستره دمایی ۵۰- °C تا ۶۰ °C حفظ می‌کنند [۲۴]. درجه چهارم، چسب‌های اپوکسی اصلاح‌شده‌ای هستند که اغلب برای کاربردهای کم‌دمایی انتخاب می‌شوند که چسب‌های پورتان و سیلیکون برای آن‌ها مناسب نباشند [۲۴].

در درجه پنجم، رزین‌های گرماسخت آکریلیک هستند که معمولاً به‌عنوان چسب‌های با ساختار عالی در دمای کمتر از ۴۰ °C- درنظرگرفته می‌شوند. آن‌ها دارای مقاومت دربرابر ورآمدگی و خزش مناسب نیز هستند، اما اثر چرخه گرمایی بر آن‌ها بسیار زیاد است. به‌طوری که تنش‌های داخلی در دمای سرمایش رشد می‌کنند و سبب پارگی درزها می‌شوند [۲۴].

برای نخستین بار، Miller و همکاران [۱۸] الزامات ماده پوششی و روش‌های آزمون آن را به‌طور کامل بررسی و تجزیه و تحلیل کردند. یکی از بهترین مواد پیشنهادی آن‌ها، پلی‌یورتان‌ها بودند. زیرا پلی‌یورتان‌ها دارای کاربردهای چندبعدی هستند و نه‌تنها در ماده بافت، بلکه در مواد اتصال‌دهنده برای اتصال لایه‌های مختلف نیز استفاده می‌شوند [۱۸].

چسب‌های پلی‌یورتانی و کاربرد آن‌ها در سامانه‌های SSA

پلی‌یورتان‌ها پلیمرهای آلی بوده که به‌شکل‌های مختلف از جمله گرمانرم، گرماسخت، الاستومر، اسفنج، چسب و غیره دردسترس هستند. این پلیمرها در زمینه‌های مختلف مانند انرژی، خودرو، پوشاک، زیست‌پزشکی، هوانوردی و کشتیرانی کاربردهای گسترده‌ای دارند. پلی‌یورتان‌ها دارای ساختار کوپلیمر دسته‌ای هستند که در آن مونومرها با یک گروه یورتان به‌هم متصل می‌شوند. درواقع، پلی‌یورتان‌ها متشکل از یک بخش نرم که مشخصه بخش پلی‌اُل است، یک بخش سخت که مشخصه بخش ایزوسیانات بوده و در آخر، بخش زنجیرافزاست. از زمان کشف آن‌ها در سال ۱۹۳۷ با استفاده از یک دی‌ایزوسیانات آلیفاتیک و یک دی‌اُل، شیمی‌دانان درباره روش‌های تهیه این استرها از کاربامیک اسید تحقیق کرده‌اند تا بهترین استفاده را از انعطاف‌پذیری آن‌ها داشته باشند. کاربرد آن‌ها به ارتباط ساختار و خواص بستگی دارد. پلی‌یورتان گرمانرم، با ساختار پلیمری خطی مشخص می‌شود و پلی‌یورتان گرماسخت، دارای پیوندهای عرضی در ساختار است. بنابراین، با تعدیل شیمی سازه می‌توان پلی‌یورتان‌های مناسب را برای کاربردهای مختلف تهیه کرد [۲۵].

اختراع پلی‌یورتان پاسخی به نیاز برای جایگزینی لاستیک بود و از زمان توسعه آن، در برخی از پیچیده‌ترین صنایع به‌دلیل ویژگی‌های برتر این پلیمر نسبت به مواد رقیب، کاربردهایی یافته است. در سراسر جهان می‌توان شاهد به‌کارگیری چسب‌های یورتانی در صنایع مهم ساخت‌وساز، بسته‌بندی، کفش، الکترونیک، پزشکی و حمل‌ونقل بود. چسب‌های یورتانی برای کاربردهایی ضروری هستند که بسیار در معرض انبساط بوده و نیازمند اتصالات قوی، انعطاف‌پذیری، مقاومت به خوردگی و دوام زیاد بودند. در میان تمام کاربردهای گوناگون چسب‌های کشسان برپایه پلی‌یورتان، استفاده از آن‌ها در سامانه‌های SSA در ارتفاع زیاد مطرح است که مزایای درخور توجهی مانند درزگیری و انعطاف‌پذیری در دمای کم، اتصال چندماده‌ای و مقرون به صرفه‌بودن را برای تأمین‌کنندگان و تولیدکنندگان در صنعت حمل و نقل ارائه می‌دهند [۲۵].

توسعه مواد مناسب برای کاربردهای SSA در ارتفاع زیاد، چالش‌های زیادی از جمله نسبت استحکام به وزن سامانه، مقاومت دربرابر گازهای بالابرنده، مقاومت دربرابر محیط زیست، انعطاف‌پذیری در ارتفاع استراتوسفری (دمای ۷۰ °C-) مقاومت در غلظت‌های زیاد ازون و تابش فرابنفش شدید را برای طراح مواد به‌همراه دارد [۲۵].

Lavan و همکاران در طراحی یک سامانه Vectran، SSA را به‌عنوان لایه پوشش بدنه با یک لایه چسب پلی‌یورتانی به لایه پلی‌آمید (لایه سدگر گاز برای حفظ هلیوم یا موارد مشابه) متصل کردند. یک لایه چسب پلی‌یورتان دوباره روی لایه پلی‌آمیدی اعمال می‌شود که روی آن لایه پلی‌وینیلیدن فلوئورید (PVDF) چسبیده است و دارای مزیت اصلی محافظت دربرابر ازون و تابش فرابنفش است. کار با این مواد چسبی پلی‌یورتانی نسبتاً آسان است و شیوه‌های ساده تولید را امکان‌پذیر می‌سازد. به‌طور ویژه، ماده پلی‌یورتان ترجیحی یک پلی‌یورتان فلوئوردار است که در دماهای کم انعطاف‌پذیری آن حفظ می‌شود و آب‌گریز نیز هست. این خاصیت دفع آب موجب می‌شود تا مانع از جذب هر گونه رطوبتی شود که ممکن است به سطح بیرونی سامانه نفوذ کند. افزون بر این، در دمای زیاد یعنی جایی که مواد در ارتفاع بالا در طول روز

در معرض آن قرار می‌گیرند، مواد چسبنده لایه‌ها را به یکدیگر می‌چسبانند و هرگونه سوراخ یا شکاف میکرونی کوچکی را پر می‌کنند که ممکن است در پوشش‌های بدنه مشاهده شود [۲۵].

Liggett و همکاران با استفاده از چسب‌های پلی‌یورتانی که در دماهای کم توانستند انعطاف‌پذیری پوشش را حفظ کنند، یک لایه فیلم پوششی شفاف را به یک لایه پوشش فلزی و یک لایه افزایش‌دهنده بازتاب به یکدیگر متصل کرده‌اند. با این روش، محافظت فوق‌العاده‌ای از تابش فرابنفش و ازون و همچنین بازتاب خورشیدی از لایه پوشش فلزی فراهم آوردند. همچنین گاهی به چسب‌ها، الیاف تقویت‌کننده یا پرکننده‌های معدنی به‌منظور بهبود خواص مکانیکی افزودند. آن‌ها از پرکننده‌های غیرآلی شامل دوده، سیلیسیم بخارشده و نانولوله‌های کربنی نیز استفاده کردند. هدف این بود که چسب از یک طرف لایه‌ها را به یکدیگر بچسباند و از طرف دیگر، هر گونه منفذ یا شکاف احتمالی در سامانه بدین وسیله پر می‌شود [۲۶].

Frandsen و همکاران یک لایه تقویت‌کننده الیافی را با استفاده از اتصالات چسبی بین دو لایه دیگر قرار دادند. این لایه چسبی یورتانی در میان یک لایه بدنه بیرونی، به‌عنوان لایه هوازدگی و یک لایه بالقوه داخلی استفاده می‌شود. در این مطالعه، لایه‌های چسب یورتانی به‌طور ویژه به‌عنوان لایه‌های اصلی سدگر گاز با نفوذپذیری کم به‌کار گرفته شدند، به‌طوری که نفوذپذیری کلی گاز لایه‌های چسب، کمتر از نفوذپذیری گاز سایر لایه‌ها بود. اصولاً چنین ترکیبی، یعنی همراه‌شدن عملکردهای چسبندگی و نفوذپذیری کم گاز، نامتعارف است. به‌طور کلی در یک سامانه، استفاده از لایه‌های اصلی سدگر گاز متفاوت از لایه‌های چسبی متداول است. گفتنی است، عملکردهای سایر لایه‌ها و به‌طور ویژه لایه هوازدگی، محافظت دربرابر تابش فرابنفش، نور مرئی، ازون، اکسیژن و گرماست [۲۷].

Kang و همکاران، لایه بیرونی بالن را با بافتی ساده از Vectran آماده کرده و این پوشش را با استفاده از چسب پلی‌یورتان با لایه‌ای از جنس Tedlar حاوی جاذب UV روکش کردند [۲۳]. Cao و Gao نیز در تهیه پوشش بالون با چندلایه‌سازی از چسب پلی‌یورتانی برای اتصال بین لایه پوشش‌های مختلف مانند Zylon، Tedlar و Mylar در کنار هم استفاده کردند [۲۸]. این موارد، چند نمونه جزئی از استفاده‌های بی‌شمار چسب‌های پلی‌یورتانی برای اتصال لایه‌های موجود در چندلایه‌ها در سامانه‌های SSA است.

ساختار سامانه‌های SSA در حال تکامل است تا ترکیب گسترده‌ای از بسترهای سبک‌تر را برای کاهش وزن دربرگیرند. فرمول‌بندی چسب به‌سرعت در حال تغییر است تا اولویت‌های مدنظر و اهداف پایداری را برآورده کند. همه این روندها بر الزامات عملکرد چسب‌های استفاده‌شده اثرگذارند. ساخت چسب‌های پلی‌یورتانی با مدول زیاد برای ارائه سفتی و استحکام پیچشی زیاد، دوام طولانی، مدیریت انبساط گرمایی و خواص درزگیری محیطی توسعه یافته است. این چسب‌ها بر مبنای اتصال چند بستر به هم فرمول‌بندی می‌شوند تا طراحی‌های چندماده‌ای سبک‌وزن را در یک لایه جای دهند [۲۸].

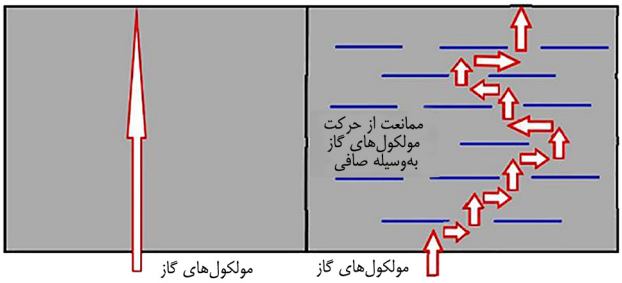
مسیر جدید برای تولیدکنندگان جهانی مطابق با استانداردهای عملکردی عالی و ایمن در بازارهای نوظهور مانند چین، روسیه و برزیل، فرمول‌بندی چسب‌های پلی‌یورتانی با نانومواد است. به‌کارگیری نانومواد، فرصت خوبی را برای احیای خواسته‌ها ایجاد می‌کند [۷]. در سامانه‌های نانویی که به‌طور ویژه برای کاربردهای وسایل نقلیه سبک‌تر از هوا طراحی‌شده‌اند، خواص و ویژگی‌ها براساس مقیاس و مناسب‌بودن سامانه تنظیم می‌شوند. نانوکامپوزیت‌های پلیمری موادی دوفازی با یک فاز پراکنده در ماتریس هستند. برای نانوکامپوزیت پلی‌یورتانی، ماتریس پلیمر برپایه پلی‌یورتان بوده و فاز تقویت‌کننده ممکن است نوعی نانوماده آلی یا ترکیبی باشد. برای دستیابی به کیفیت لازم در خواص چسب نهایی، پرکننده باید دو شرط داشته باشد:

– پراکندگی خوب در نانوکامپوزیت داشته باشد و

– میان پرکننده و ماتریس پلیمری اتصال مناسبی وجود داشته باشد [۷].

روش‌های ساخت نانوکامپوزیت را می‌توان به سه گروه اصلی تقسیم کرد: پلیمرشدن درجا [۲۹]، مخلوط‌کردن در حالت مذاب [۳۰] و مخلوط‌کردن در حالت محلول [۳۱]. در اقع روش تهیه نانوکامپوزیت‌های پلی‌یورتانی، تداخل بین پرکننده و پلیمر را کنترل می‌کند. نانوکامپوزیت‌های پلی‌یورتانی، آینده امیدبخشی در راستای ساخت سامانه‌های SSA ایمن، کارآمد و مقرون به صرفه دارند [۷].

در تهیه نانوکامپوزیت‌های پلی‌یورتانی با کاربرد در سامانه‌های SSA، به‌طورمعمول از پرکننده‌های نانوکربنی مانند گرافن، نانولوله‌های کربنی (CNT) و نانوالیاف آن‌ها، تیتانیم دی‌اکسید (TiO_2)، نانورس و سیلیسیم دی‌اکسید (SiO_2) بسیار استفاده می‌شوند [۳۲]. در میان خواص گوناگون پلی‌یورتان‌های به‌کارگرفته‌شده در چسب‌های سامانه‌های SSA، مشخصه نفوذپذیری گاز پلی‌یورتان با وجود نانوپرکننده‌های صفحه‌ای نفوذناپذیر مانند سیلیکات‌های لایه‌ای (خاک رس)، گرافن، گرافن اکسید و غیره، به‌طور درخور توجهی کاهش می‌یابد. این نانومواد به‌طور عمده به‌عنوان سدگر



شکل ۸- تصویر موانع ایجادشده با صافی برای کاهش نفوذپذیری گاز در پلی‌یورتان [۷].

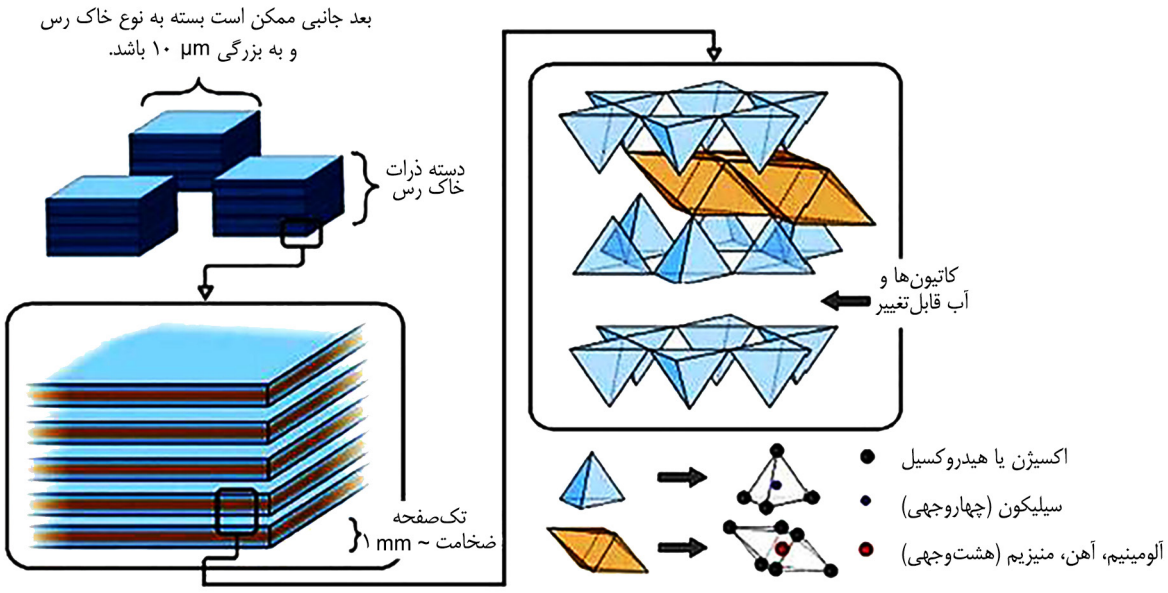
فیزیکی عمل می‌کنند. افزایش مسیرهای پیچیده و درنتیجه افزایش مدت انتشار مولکول‌های گاز، خاصیت سدگری گاز ماتریس پلی‌یورتانی را بهبود می‌بخشند (شکل ۸) [۷].

نانوذرات دیگری مانند آلومینیم اکسید (Al_2O_3)، مواد نانوهیبریدی، اولیگومرهای چندوجهی سیلسسکیوکسان (POSS) و نانوسلولوز هم می‌توانند خاصیت سدگری گاز پلی‌یورتان را بهبود بخشند. این نانومواد ممکن است با ماتریس پلی‌یورتان واکنش داده و با تغییر شکل‌شناسی آن، خاصیت مزبور را افزایش دهند. اخیرا پژوهشگران بیان داشته‌اند، بور نیترید شش‌وجهی (دارای هم‌ساختار دوبعدی گرافن که از نظر اتمی نازک بوده و ترکیبی غیرکربنی است) نیز دارای قابلیت بالقوه خوبی برای افزایش خاصیت سدگری گاز پلیمرهاست [۳۲].

Joshi و همکاران [۳۳]، مطالعه‌ای در زمینه امکان‌سنجی استفاده از نانوکامپوزیت پلی‌یورتان-خاک رس برای بهبود خواص سدگری گازی در سامانه‌های SSA گزارش کرده‌اند. Chatterjee و همکاران [۳٤]، از روشی مبتنی بر طراحی آزمایش برای بهینه‌سازی پرکننده‌های نانو در پلی‌یورتان و به‌حداقل‌رساندن نفوذپذیری گاز استفاده کرده‌اند [۳٤].

Duncan از سیلیکات‌های لایه‌ای برای بهبود خواص مکانیکی، خاصیت سدگری گاز، پایداری گرمایی، مقاومت دربرابر شعله و مقاومت دربرابر خوردگی چسب‌های پلی‌یورتانی استفاده کرد. لایه‌های رس با نیروهای ضعیف وان‌درووالسی انباشته می‌شوند و حفره‌های خاک رس با برخی از کاتیون‌های تبادل‌پذیر یا رطوبت اشغال می‌شوند. معمول‌ترین رس‌های به‌کاررفته در چسب‌های پلی‌یورتانی، سیلیکات‌های لایه‌ای یا فیلوسیلیکات‌های ۲:۱ مانند مونتموریلونیت (MMT)، ساپونیت، بنتونیت و هکتوریت هستند. ساختار بلورنگاری سیلیکات‌های لایه‌ای ۲:۱ از چند لایه تشکیل‌شده است. در لایه خاصی از این ساختار، یک ورق هشت‌وجهی آلومینا یا منیزیم بین دو ورق سیلیکات چهاروجهی قرار می‌گیرد (شکل ۹) [۳۵].

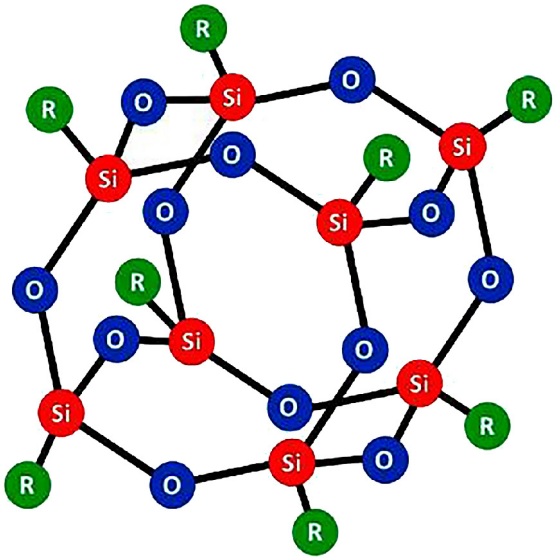
گرافن، صفحه‌ای مسطح تک‌اتمی از اتم کربن دوبعدی و پهن دارای پیوند sp^2 است که به‌طور متراکم در یک شبکه بلوری لانه زنبوری قرار گرفته و طول پیوند کربن-کربن در آن ۰/۱٤۲ nm است. در میان نانوپرکننده‌های مختلف، انواع برپایه گرافن به‌دلیل قابلیت بالقوه در بهبود رسانندگی الکتریکی و گرمایی، خواص مکانیکی، جذب ریزموج، عملکرد دی‌الکتریک، مقاومت دربرابر آب و هوا و سدگری گازی ماتریس‌های پلی‌یورتانی، به‌عنوان بهترین نانوپرکننده‌ها برای کاربردهای نسل جدید پلیمرها به‌شمار می‌روند.



شکل ۹- ساختار رس فیلوسیلیکات ۲:۱ [۳۵].

به‌دلیل ساختار بشقاب‌مانند و اندازه منافذ هندسی بسیار کوچک (۰/٦٤ nm)، گرافن در بهبود خاصیت سدگری گازی پلیمرهای متعددی از جمله پلی‌یورتان بسیار کارآمد است. ضخامت یک ورق گرافن فقط ۱/۱۵۳ nm است، اما حتی دربرابر اتم‌های هلیوم نیز نفوذناپذیر است [۳٦]. خواص شیمی‌فیزیکی نانوکامپوزیت‌های برپایه گرافن به توزیع لایه‌های گرافن در ماتریس پلیمر و پیوند سطحی میان این لایه‌ها و ماتریس پلیمر بستگی دارد. گرافن بکر، به‌دلیل نداشتن گروه‌های عاملی، سازگاری ضعیفی با اکثر پلیمرهای آلی نشان می‌دهد و بدین دلیل کامپوزیت‌های همگن تشکیل نمی‌دهد. درمقابل، ورق‌های گرافن اصلاح‌شده مانند گرافن اکسید، گرافن اکسید کاهش‌یافته و گرافن دارای گروه عاملی (به‌عنوان مثال گرافن اصلاح‌شده با هیدروکسیل) با پلیمرهای آلی سازگاری بیشتری دارند [۳۷].

اولیگومرهای چندوجهی سیلوکسان (POSS) که یکی از نوظهورترین مواد نانوساختار ترکیبی هستند، ساختار چندوجهی یا شبیه به قفس در ابعاد نانو دارند. آن‌ها دارای هسته معدنی حاوی اکسیژن و سیلیکون (Si-O) و چهارچوب آلی جانشین‌دار (R) در گوشه‌ها هستند (شکل ۱۰). هسته معدنی Si-O از نظر شیمیایی و گرمایی مقاوم است. جانشین‌های آلی (R) ممکن است دارای ساختارهای زنجیری هیدروکربنی (غیرقطبی) یا ساختارهای قطبی یا گروه‌های عاملی باشند. با کنترل این ساختارهای آلی، می‌توان شیمی خواص و واکنش‌پذیری POSS را تنظیم کرد. POSS برای بهبود پایداری گرمایی، بازدارندگی شعله، خواص مکانیکی و رئولوژیکی و حتی گاهی مشخصه سدگری گازی در پلی‌یورتان و سایر پلیمرها یا ترکیبات پلیمری گنجانده شده است [۳۸].



شکل ۱۰- ساختار شیمیایی پایه POSS [۳۲].

ویژگی‌ها و الزامات مهم چسب‌های پلی‌یورتان در سامانه‌های SSA

نفوذپذیری

نفوذپذیری چسب‌های مصرفی در سامانه‌های SSA باید حداقل باشد. ایجاد پارگی یا منفذ در طول زمان به‌کارگیری، امری عادی و اجتناب‌ناپذیر است و موجب خروج گاز به محیط زیست و نیاز به پرشدن مجدد سامانه‌های SSA با گاز می‌شود که ضررهای زیادی را به‌همراه دارد [۳٤].

همان‌طور که پیش از این نیز بیان شد، پلی‌یورتان‌ها از جمله پلیمرهایی هستند که دارای نفوذپذیری گاز کم هستند. نفوذپذیری پلی‌یورتان به ساختار بخش نرم و سخت آن بستگی دارد. افزایش حجم بخش سخت، نفوذپذیری را کاهش داده و افزایش حجم بخش نرم، نفوذپذیری را افزایش می‌دهد [۳۹،٤۰]. این‌گونه بیان شده است که بخش‌های سخت مانند ذرات پرکننده و اتصال‌دهنده عرضی عمل کرده و حرکت بخش‌های نرم را مهار می‌کنند که به خاصیت عبور گاز منجر می‌شود. سختی پلی‌یورتان به نوع ایزوسیانات استفاده‌شده در سنتز بستگی زیادی دارد. ایزوسیانات‌های آروماتیک در مقایسه با آلیفاتیک موجب سختی بسیار بیشتری می‌شوند. در یک مطالعه جالب، Madhavan و همکاران از طریق مجموعه‌ای از غشاهای پلی(دی‌متیل‌سیلوکسان-یورتان) (PDMS-PU)، اثر ایزوسیانات‌های مختلف (TDI، HMDI و MDI) به‌عنوان بخش سخت و PDMS به‌عنوان بخش نرم را بر نفوذپذیری گاز مطالعه کردند. آن‌ها بدین نتیجه رسیدند، افزایش بخش نرم PDMS به افزایش نفوذپذیری همه گازها (O_2، N_2 و CO_2) منجر می‌شود. جداسازی فاز ممکن است به‌دلیل تفاوت پارامتر حل‌پذیری در هر دو بخش سخت و بخش نرم درگیر باشد. فازهای PDMS پراکنده در غشاها برای تولید مسیری با مقاومت کمتر برای انتشار مولکول‌ها عمل می‌کنند. شایان ذکر است، ویژگی نفوذناپذیری گاز برای پلی‌یورتان‌ها را می‌توان با پرکننده‌های سدگر عبور مولکول‌های گاز، افزایش داد [٤۱].

مقاومت دربرابر تغییرات آب و هوایی

سامانه‌های SSA به‌شدت در معرض تابش فرابنفش، باران، رطوبت، آلاینده‌های زیست‌محیطی و سایر شرایط سخت قرار می‌گیرند. انتظار می‌رود، این سامانه‌ها دربرابر شرایط مزبور تحمل زیادی داشته باشند. افزون بر این انتظار می‌رود، اجزای سازنده آن توان استقرار طولانی‌مدت را دارا باشند که برای آن طراحی شده‌اند. پلی‌یورتان

مقاومت بسیار خوبی دربرابر تغییرات آب و هوایی دارد. در این راستا می‌توان به مطالعه Das و همکاران [۴۲] اشاره کرد. آن‌ها نشان دادند، پلی‌یورتان‌های برپایه روغن کرچک مقاومت بسیار خوبی دربرابر تغییرات آب و هوایی دارند [۴۲].

اتصال‌پذیری

جنس چسب‌ها باید طوری باشد که در هنگام تهیه چندلایه‌ها، لایه‌های مختلف و محل درزها در سامانه SSA از قابلیت اتصال بسیار خوبی برخوردار باشند. از یک سو، قابلیت بلورش بخش نرم پلی‌یورتان‌ها، اتصال‌پذیری را بهبود می‌بخشد. از سوی دیگر، پلی‌یورتان‌ها با ایجاد پیوند هیدروژنی در بخش‌های قطبی و برهم‌کنش‌های کووالانسی می‌توانند اتصالات مطلوبی را سبب شوند. بنابراین، چسب‌های پلی‌یورتانی مقرون به صرفه بوده و با بسیاری از بسترها سازگار هستند [۴۳].

خستگی خمشی

خستگی یا پدیده ترکخوردگی تحت فشار و کشش‌های استوانه‌ای در لاستیک‌ها بسیار محتمل است. در میان پلیمرها پلی‌یورتان‌ها دارای خاصیت خستگی مطلوبی هستند که با افزایش پیوندهای عرضی در آن‌ها، این خاصیت کاهش می‌یابد [۴۴]. Werner و همکاران [۴۵] درباره الاستومرهای پلی‌یورتان و میزان خستگی آن‌ها تحت بیشترین فشار، مطالعه کردند و به پارامترهای مؤثر بسیاری دست یافتند.

قابلیت درزگیری گرمایی

قابلیت درزگیری گرمایی، خاصیت فیلم‌های پلیمری است که با استفاده از اندکی گرما به یکدیگر متصل می‌شوند. قابلیت درزگیری گرمایی و یک‌پارچگی درز حاصل به سه عامل دستگاه، رزین و فیلم و تعامل بین این سه عامل بستگی دارد. پلی‌یورتان‌ها حتی در دماهای کم، قابلیت درزگیری گرمایی دارند [۴۶]. Anshyang و همکاران [۴۷]، درباره میزان انتشار پلی‌یورتان مطالعه کرده و قابلیت درزگیری گرمایی پلی‌یورتان را از ۷۶ °C تا ۱۱۶ °C گزارش کرده‌اند [۴۷].

پایداری در دمای کم

سامانه‌های SSA به‌دلیل چرخه روزانه و آنتروپی گاز داخلی، در طول عمر خود در معرض تغییرات دمایی زیادی در شرایط سخت محیطی قرار می‌گیرند. دمای محیط می‌تواند از ۶۰ °C- تا ۶۰ °C متغیر باشد. از سوی دیگر، به‌دلیل تغییر ارتفاع زیاد، تغییرات فشار نیز اثرهای منفی ایجاد می‌کند. پلی‌یورتان در دمای کم دارای ویژگی‌های بسیار عالی از جمله اتصال‌پذیری قوی، انعطاف‌پذیری کافی، نفوذپذیری کم، خواص مکانیکی مطلوب و حتی قابلیت درزگیری گرمایی است [۷].

خواص مکانیکی

پلی‌یورتان‌ها دارای خواص مکانیکی مطلوب SSA هستند. خواص مکانیکی در پلی‌یورتان‌ها به ترکیب بخش‌های سخت و نرم همراه با برهم کنش بین‌مولکولی بستگی دارد. افزایش بخش سخت باعث بهبود خواص استحکامی پلی‌یورتان می‌شود. پلی‌یورتان‌ها می‌توانند دارای استحکام کششی گسترده در محدوده ۲۰ MPa تا ۹۶ MPa و کشسانی استاندارد در محدوده ۰/۵ GPa تا ۵/۵ GPa باشند. همچنین، محدوده انعطاف‌پذیری گسترده‌ای در حدود ۰/۵ GPa تا ۴/۵ GPa را می‌توانند پوشش دهند [۴۸].

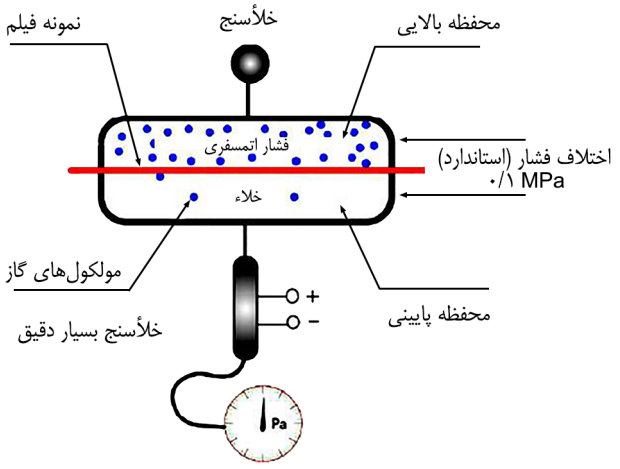
آزمون‌های ارزیابی چسب‌های پلی‌یورتانی مصرفی در سامانه‌های SSA

آزمون نفوذ هلیوم

از آنجا که سامانه‌های SSA باید قابلیت حمل گاز هلیوم را برای زمان طولانی داشته باشند، آزمون‌های نفوذ هلیوم بسیار مهم و جدی تلقی می‌شود. به‌منظور بررسی نفوذپذیری هلیوم، این آزمون به روش مانومتری M ارائه‌شده در استاندارد ASTM D1434 انجام می‌شود. قابل ذکر است، این روش برای تخمین میزان انتقال گاز از طریق مواد به‌شکل فیلم، ورقه، لایه یا بافت‌های روکش‌دار استفاده می‌شود [۱].

سرعت انتقال گاز و همچنین ضریب‌های حل‌پذیری، انتشار و نفوذپذیری را می‌توان با کمک تجهیزات ویژه اندازه‌گیری کرد. دمای آزمون به‌طور مداوم با حمام آب در دمای ۲۳ °C کنترل می‌شود. اساس این روش بر اختلاف فشار استوار است (شکل ۱۱) و در آن اختلاف فشار ۰/۱ MPa در دو طرف نمونه ایجاد می‌شود. پس از اینکه فرایند انتقال پایدار شد، مشخصه سدگری مواد را می‌توان با تغییرات فشار به‌دست‌آمده از محفظه پایین محاسبه کرد [۱].

آزمون‌های نفوذ هلیوم باید حتما روی سه نمونه انجام شود. نمونه آزمایش باید فاقد چین و چروک، سوراخ و سایر نقص‌ها بوده و از ضخامت یکنواختی برخوردار باشد. نمونه آزمون باید در اندازه استاندارد (دایره‌ای با قطر ۳۵ mm) و متناسب با سلول آزمون بریده شود. ضخامت نمونه (۲/۵ µm) حداقل در پنج نقطه از



شکل ۱۱- نمای دستگاه سنجش اختلاف فشار در دو طرف فیلم در آزمون نفوذپذیری گاز [۱].

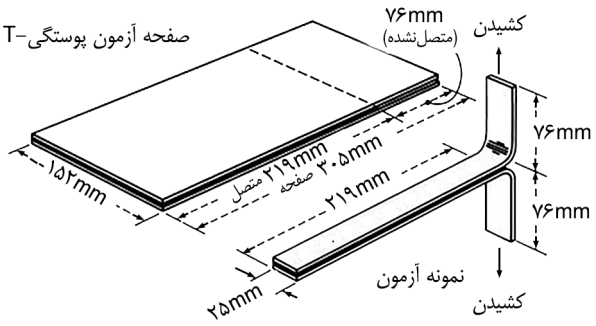
محدوده آزمون باید با یک شماره‌گیر مدرج کالیبره‌شده اندازه‌گیری شود. مقادیر حداکثر، حداقل و متوسط باید ثبت شوند. از آنجا که نمونه‌ها ضخیم و محکم هستند، ترجیح داده می‌شود که گریس بیشتری در ناحیه حلقوی مدنظر در سطح پایین محفظه زده شود تا درزگیری خوبی داشته باشد. دریچه گاز باز است و به گاز هلیوم اجازه می‌دهد تا به محفظه بالایی جریان یابد. پس از شروع آزمون، فشار در محفظه پایین فورا اندازه‌گیری می‌شود. درنهایت، منحنی فشار برحسب زمان برای به‌دست‌آوردن سرعت انتقال گاز رسم می‌شود [۱].

آزمون استحکام پوستگی

آزمون استحکام پوستگی براساس استاندارد ASTM 1876-08 برای چسب‌های پلی‌یورتانی بر بستری از پوشش بدنه انجام می‌شود. برای ساخت نمونه‌های آزمون، ابتدا فیلم‌هایی با ضخامت حدود ۰/۲۵ mm بین دو قطعه پارچه به طول ۳۰۵ mm و پهنای ۱۵۲ mm مطابق استاندارد اعمال می‌شوند (شکل ۱۲) و به‌مدت حدود ۱۰ min در دمای ۱۶۰ °C در دستگاه پرس گرم قرار می‌گیرند. درنهایت، پس از خارج‌کردن نمونه‌ها از دستگاه و هم‌دماشدن با محیط، نوارهایی به پهنای ۲۵ mm از آن‌ها بریده می‌شود و تحت آزمون قرار می‌گیرند. این آزمون در دستگاه کشش با فاصله بین دو فک ۱۰ cm و سرعت ۲۵٤ mm/min انجام می‌شود [۱].

استحکام کششی

آزمون کشش نمونه‌ها براساس استاندارد ASTM D882 برای فیلم‌های برپایه چسب پلی‌یورتان با ضخامت، طول و عرض به ترتیب حدود ۰/۲۵، ۱۲ و ۲ mm در دستگاه آزمون کشش با



شکل ۱۲- مشخصات نمونه‌های آزمون استحکام پوستگی [۱].

محدوده بارگذاری و گیره‌های مناسب انجام می‌شود تا نمونه‌ها طی آزمون محکم و بدون لغزش بمانند. براساس روش آزمون، استحکام و پارگی نمونه محاسبه می‌شود [۱].

نتیجه‌گیری

سامانه‌های سبک‌تر از هوا (LTA) می‌توانند جایگزین بسیار مفید و ارزان‌قیمتی برای ماهواره‌ها باشند. در طراحی کشتی‌های هوایی به‌عنوان یکی از زیرمجموعه‌های بسیار مهم سامانه‌های LTA، اصولاً از موادی با مقاومت عالی دربرابر محیط جو، غلظت زیاد ازون، UV شدید و دمای بسیار کم استفاده می‌شود. از آنجا که LTA در استراتوسفر کار می‌کنند، چالش‌های اصلی مواد بدنه، استحکام چسب و طراحی و فناوری اتصالات درزهاست. طراحی یک اتصال کارآمد که برابر یا قوی‌تر از مواد بدنه باشد، به اندازه پوشش بدنه حیاتی است. چسب در کامپوزیت‌های چندلایه برای اتصال لایه‌های مختلف به یکدیگر استفاده می‌شود. اعمال یک لایه نازک از چسب برای به‌حداقل‌رساندن وزن مواد بسیار مهم است. چسبندگی خوب اجزا به یکدیگر (برای جلوگیری از جدایش) و انعطاف‌پذیری در دمای کم از الزامات اساسی چسب استفاده‌شده در این سامانه‌هاست. پلی‌یورتان‌ها یکی از پرکاربردترین دسته پلیمرهای به‌کاررفته به‌عنوان چسب در سامانه‌های فضایی محسوب می‌شوند که از نظر خواص دارای برتری ذاتی نسبت به سایر رقبا هستند. این خواص شامل پایداری در دمای کم، انعطاف‌پذیری عالی، حداقل عبور گاز، قابلیت اتصال به لایه‌های مختلف و خواص گرمایی مطلوب (تغییرات انبساطی کم) است. با توسعه کامپوزیت‌های جدید، به‌ویژه انواع حاوی نانومواد، طراحان سامانه‌های سبک‌تر از هوا بیش از هر زمان دیگری قدرت انتخاب دارند. در این

زمینه کاربردی، نانوکامپوزیت‌های پلی‌یورتانی نقش بسیار فعالی دارند. پیش‌بینی‌های جهانی بر این پایه است که سامانه‌های نوین سبک‌تر از هوا نقشی مشابه ماهواره‌ها را می‌توانند ایفا کنند. بنابراین در نیم‌دهه اخیر، تلاش برای گسترش تجاری سامانه‌های LTA به‌عنوان جایگزینی برای ماهواره‌های گران‌قیمت با اهداف یکسان (ماهواره‌های مدارپایین) در حال انجام است. بسیاری از سازمان‌های تجاری و نظامی در سراسر جهان برای ارتقای این سامانه‌ها تلاش می‌کنند. در حال حاضر، بیش از ۳۰ شرکت علاقه‌مند به توسعه این سامانه‌ها و ایستگاه‌های هوایی در چین، فرانسه، آلمان، هند، ژاپن، کره جنوبی، روسیه، انگلستان و ایالات متحده در حال فعالیت هستند. با وجود مطالعات زیاد انجام‌گرفته درباره این سامانه‌ها، هنوز فرصت‌های بسیاری برای مطالعه در زمینه صنعت سامانه‌های سبک‌تر از هوا وجود دارد که در این مقاله تلاش شد، گامی برای ورود به پژوهش و تولید این سامانه‌ها برداشته شود.

مراجع

1. Li A., *Evaluation of Laminated Hull Material for High Altitude Airship*, PhD Thesis, North Carolina State University, 2018.
2. Jamison L., Sommer G.S., and Porche I.R., *High-Altitude Airships for the Future Force Army*, Rand Arroyo Center Santa Monica CA, USA, 2005.
3. Ugale P.M., *Evaluation of Components of High Altitude Stratospheric Airship*, PhD Thesis, North Carolina State University, 2018.
4. Goodyear's New Blimp Wingfoot Two Arrives in Los Angeles, https://www.goodyearblimp.com/news-and-events, February, 2020.
5. Gawande V., Bilaye P., Gawale A., Pant R., and Desai U., Design and Fabrication of an Aerostat for Wireless Communication in Remote Areas, *7th AIAA ATIO Conf. and 2nd CEIAT Int*, Belfast, Northern Ireland, 7832-7835, 18-20 September, 2007.
6. Mayer N. and Krida R., A Review of Lighter-than-Air Progress in the United States and Its Technological Significance, *Acta Astronaut*., **5**, 917-934, 1978.
7. Dhawan A. and Jindal P., A Review on Use of Polyurethane in Lighter than Air Systems, *Mater. Today: Proc*., **43**, 746-752, 2021.
8. Dasaradhan B., Das B.R., Sinha M.K., Kumar K., Kishore B., and Prasad N.E., A Brief Review of Technology and Materials for Aerostat Application, *Asian J. Text*., **8**, 1-12, 2018.
9. Colozza A. and Dolce J.L., *High-Altitude, Long-Endurance Airships for Coastal Surveillance*, NASA Technical Report, TM-213427, 2005.
10. Needs C., Defense Acquisitions Future: *Aerostat and Airship Investment Decisions Drive Oversight and Coordination Needs*, U.S. Government Accountability Office, 2012.
11. Androulakakis S.P. and Judy R., Status and Plans of High Altitude Airship (HAATM) Program, *AIAA Lighter-Than-Air Systems Technology (LTA) Conference*, Daytona Beach, Florida, 1362, 25-28 March, 2013.
12. Fesen R. and Brown Y., A Method for Establishing a Long Duration, Stratospheric Platform for Astronomical Research, *Exp. Astron*., **39**, 475-493, 2015.
13. Smith I., Lee M., Fortneberry M., and Judy R., HiSentinel80: Flight of a High Altitude Airship, *11th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference*, Virginia Beach, VA, 6973, 20-22 September, 2011.
14. Oliveira F.A., Melo F.C.L.d., and Devezas T.C., High-Altitude Platforms-Present Situation and Technology Trends, *J. Aerosp. Technol. Manag*., **8**, 249-262, 2016.
15. Liao L. and Pasternak I., A Review of Airship Structural Research and Development, *Prog. Aerosp. Sci*., **45**, 83-96, 2009.
16. Claro S.E.C., *Manufacturing Techniques of a Hybrid Airship Prototype*, PhD Thesis, University of Beira Interior, 2015.
17. Komatsu K., Sano M.-A., and Kakuta Y., Development of High-Specific-Strength Envelope Materials, *3rd AIAA's Annual Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference*, Denver, Colorado, 6765, 17-19 November, 2003.
18. Miller T. and Mandel M., Airship Envelopes: Requirements, Materials and test Methods, *3rd International Airship Convention and Exhibition*, Friedrichshafen, A19, 1-5 July, 2000.
19. Islam S. and Bradley P., *Materials, In Airship Technology*, Cambridge University, New York, 207-229, 2012.
20. Zhai H. and Euler A., Material Challenges for Lighter-Than-Air Systems in High Altitude Applications, *AIAA 5th ATIO And 16th Lighter-Than-Air Sys Tech. and Balloon Systems Conferences*, Arlington, Virginia, 7488, 26-28 September, 2005.
21. Seyam A.-F.M., Bradford P.D., Vallabh R., and Li A., Textile Laminates for High-altitude Airship Hull Materials–A Review, *J. Text. Appar. Technol. Manag*., **11**, 1-22, 2019.
22. Petrie E.M., *Handbook of Adhesives and Sealants*, McGraw-Hill, New York, 237-257, 2007.

and Sensors, *J. Colloid Interf. Sci*., **363**, 1-24, 2011.
36. Yoo B.M., Shin H.J., Yoon H.W., and Park H.B., Graphene and Graphene Oxide and their Uses in Barrier Polymers, *J. Appl. Polym. Sci*., **131**, 1-23, 2014.
37. Das T.K. and Prusty S., Graphene-Based Polymer Composites and their Applications, *Polym. Plast. Technol. Eng*., **52**, 319-331, 2013.
38. Joshi M. and Bhattacharyya A., Nanotechnology–A New Route to High-Performance Functional Textiles, *Text. Prog*., **43**, 155-233, 2011.
39. Matsunaga K., Sato K., Tajima M., and Yoshida Y., Gas Permeability of Thermoplastic Polyurethane Elastomers, *Polym. J*., **37**, 413-417, 2005.
40. Semsarzadeh M.A., Sadeghi M., and Barikani M., Effect of Chain Extender Length on Gas Permeation Properties of Polyurethane Membranes, *Iran. Polym. J*., **17**, 431-440, 2008.
41. Madhavan K. and Reddy B., Poly(dimethylsiloxane-urethane) Membranes: Effect of Hard Segment in Urethane on Gas Transport Properties, *J. Membr. Sci*., **283**, 357-365, 2006.
42. Das S., Pandey P., Mohanty S., and Nayak S.K., Insight on Castor Oil Based Polyurethane And Nanocomposites: Recent Trends and Development, *Polym. Plast. Technol. Eng*., **5**, 1585-1556, 2017.
43. Cognard P., *Handbook of Adhesives and Sealants: Basic Concepts and High Tech Bonding*, Elsevier, UK, 117-140, 2005.
44. Szycher M., *Handbook of Polyurethanes*, CRC, USA, 57-100, 2013.
45. Werner B.H., Polyurethane Elastomers Having Prolonged Flex Life and Tires Made Therefrom, *US Pat. 2866774A, 1976*.
46. Karak N., *Biobased Smart Polyurethane Nanocomposites: From Synthesis to Applications*, RSC, UK, 303-370, 2017.
47. Anshyang L., Agnihotri R.V., and Beetz G.C., Aqueous Dispersions Comprising Polyurethane and Ethylenic Copolymers for Heat Sealable Coatings, *Patents Assigned to Actega North America,* 10611928, 2020.
48. Samarth N., Kamble V., Rane A.V., Abitha V.K., Gohatre O., and Kanny K., Mechanical and Dynamic Mechanical Properties of Polyurethane Blends and Interpenetrating Polymer Networks, *Polyurethane Polymers*, Elsevier, UK, 377-397, 2017.

23. Kang W., Suh Y., Woo K., and Lee I., Mechanical Property Characterization of Film-Fabric Laminate for Stratospheric Airship Envelope, *Compos. Struct*., **75**, 151-155, 2006.
24. Lewis A.F. and Saxon R., *Epoxy Resin Adhesives: Epoxy Resin Chemistry and Technology*, Marcel Dekker, New York, 203-237, 1973.
25. Lavan C.K. and Kelly D.J., Flexible Laminate Material for Lighter-Than-Air Vehicles, *US Pat. 7354636B2*, 2008.
26. Liggett P.E., Carter D.L., Dunne A.L., Darjee D.H., Placko G.W., Mascolino J.I. et al., Metallized Flexible Laminate Material for Lighter-Than-Air Vehicles, *Eu Pat. 1926591B*, 2013.
27. Frandsen M.V., Kim D., Bradford P.D., Seyam A.-F.M., Vallabh R., and Li A., A Lighter-Than-Air Vehicle with a Hull, a Laminate for Such Hull and a Method of Production of Such Laminate, *US Pat. 2020030716 9A1*, 2018.
28. Cao X. and Gao C.-X., Fabrication and Investigation of Envelope Materials for Stratospheric Aircraft with PBO Fabric as Load-carriers, *Hi-Tech. Fiber Appl.*, **4**, 1-5, 2009.
29. Chen D. and Chen G., In Situ Synthesis of Thermoplastic Polyurethane/Graphene Nanoplatelets Conductive Composite by Ball Milling, *J. Reinf. Plast. Compos*., **32**, 300-307, 2013.
30. She Y., Chen G., and Wu D., Fabrication of Polyethylene/Graphite Nanocomposite from Modified Expanded Graphite, *Polym. Int*., **56**, 679-685, 2007.
31. Goyal M., Goyal N., Kaur H., Gera A., Minocha K., and Jindal P., Fabrication and Characterisation of Low Density Polyethylene (LDPE)/Multi Walled Carbon Nanotubes (MWCNTs) Nano-Composites, *Perspect. Sci*., **8**, 403-405, 2016.
32. Joshi M., Adak B., and Butola B., Polyurethane Nanocomposite Based Gas Barrier Films, Membranes and Coatings: A Review on Synthesis, Characterization and Potential Applications, *Prog. Mater. Sci*., **97**, 230-282, 2018.
33. Joshi M., Banerjee K., Prasanth R., and Thakare V., Polymer/Clay Nanocomposite Based Coatings for Enhanced Gas Barrier Property, *Indian J. Fibre Text. Res*., **31**, 202-214, 2006.
34. Chatterjee U., Butola B., and Joshi M., Optimal Designing of Polyurethane-Based Nanocomposite System for Aerostat Envelope, *J. Appl. Polym. Sci.*, **133**, 1-9, 2016.
35. Duncan T.V., Applications of Nanotechnology in Food Packaging and Food Safety: Barrier Materials, Antimicrobials