

Polymerization
Quarterly, 2013
Volume 3, Number 4
Pages 26-34
ISSN: 2252-0449

Use of Polymer Skins in the Morphing Technology

Pouyan Ghabezi

Young Researchers and Elites Club, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Received: 22 September 2013, Accepted: 6 January 2014

Abstract

Skins related-morphing technology, are studied with relation to their mechanical and thermal properties. Morphing wings are those wings that can undergo self-change in shape and geometry. Although, engineers present different configurations for self-changing wings but there are not much studies on skin materials in this wings. A suitable material in morphing skins has to be elastic and flexible and capable of fast recovery to its initial condition. Also, it should be resistant against different environmental conditions, chemicals and abrasive agents, and sufficient hardness number of its structure to tolerate the aerodynamic loads. According to the above notes, the commercial materials are selected to meet the necessary requirements and include thermoplastic polyurethane, elastomeric copolymer, shape memory polymers and woven materials. First, history of different configurations of morphing wings is described and it is concluded that different configurations and shapes must not include hard materials as morphing wings.

Key Words

morphing,
polymer,
aero structure,
skin,
aerodynamic

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: pouyan.ghabezi@gmail.com

به کارگیری پوسته‌های پلیمری در فناوری مورفینگ

پویان قابضی

تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان

دریافت: ۱۳۹۲/۶/۳۱، پذیرش: ۱۳۹۲/۱۰/۱۶

در این مقاله، ویژگی‌های مکانیکی و گرمایی پوسته‌های استفاده شده در فناوری مورفینگ بررسی شده است. بال‌های مورفینگ به بال‌هایی گفته می‌شود که قابلیت تغییر شکل و هندسه خود را دارند. اگرچه مهندسان، پیکربندی‌های مختلفی از بال‌های دارای شکل متغیر ارائه داده‌اند، اما در زمینه موادی که می‌توان از آنها به عنوان پوسته این گونه بال‌ها استفاده کرد، مطالعات چندانی انجام نگرفته است. ماده مناسب برای استفاده در پوسته بال‌های مورفینگ باید کشسان و انعطاف‌پذیر باشد و قابلیت بازیابی حالت اولیه خود را تا حد زیادی داشته باشد. همچنین، ماده باید در برابر شرایط مختلف آب و هوایی، عوامل ساینده و مواد شیمیایی مقاوم بوده و عدد سختی آن نیز به قدر کافی زیاد باشد تا بارهای آیرودینامیک وارد بر هواپیما را تحمل کند. بر مبنای برخی از این ضوابط، موادی انتخاب شده‌اند که در بازارهای تجاری عرضه می‌شوند. موادی که در این پژوهش بررسی می‌شوند، شامل نوعی از پلی‌یورتان‌های گرمانرم، الاستومر کوپلیمر، پلیمرهای حافظه‌دار و مواد بافته شده هستند. در ابتدا، تاریخچه انواع پیکربندی‌های استفاده شده در بال‌های مورفینگ بحث و بررسی می‌شوند. این پیکربندی‌ها و اشکال گوناگون نشان دادند، یک ماده سخت را نمی‌توان به عنوان پوسته بال مورفینگ به کار گرفت.

چکیده



پویان قابضی

واژگان کلیدی

مورفینگ،
پلیمر،
سازه هوایی،
پوسته،
آیرودینامیک

مقدمه

دهنده پیشرفت‌های شگرفی انجام گرفته است. اما یکی از نتایج بارز در باره بال‌های یاد شده این است که آنها فقط می‌توانند بین دو شکل خاص تغییر حالت دهند. بال‌های مورفینگ در آینده قابلیت آن را خواهند داشت تا چند شکل به خود بگیرند، بدین ترتیب هواپیما می‌تواند قابلیت تغییر و انطباق با مجموعه‌ای از مأموریت‌ها را داشته باشد. درک چگونگی مانور و عملکرد بال ما را در زمینه تعیین خواص مواد مورد نیاز برای بال‌های مورفینگ، یاری خواهد کرد.

استفاده از مواد کشسان و انعطاف پذیر

تاریخ نشان می‌دهد، بیشتر هواپیماها برای انجام یک مأموریت ویژه طراحی می‌شوند. می‌توان به بمب افکن‌های B-52 و مخفی B-2 اشاره کرد که دارای طول بال زیادی هستند و امکان پرواز مطلوب در مأموریت‌های طولانی را فراهم می‌سازند. اما به دلیل عدم داشتن قابلیت برای انجام مانور به عنوان هواپیمای جنگنده به کار نمی‌روند. از سوی دیگر، F-14 تاجکات (Tochtut) و F-18 هرنت، دارای بال‌های کوچکتر بوده و در وهله اول به عنوان هواپیماهای جنگنده تهاجمی به کار می‌روند، زیرا قابلیت مانور بیشتری دارند. برای اسکورت اکثر هواپیماهای بمب افکن از هواپیماهای کوچکتر و سبک‌تر که قابلیت مانور سریع‌تری دارند، مانند F-18:F-14 آنها استفاده می‌شوند. از ویژگی‌های جدیدی که برای هواپیماهای نظامی در نظر گرفته می‌شود، این است که هم از خواص یک بمب افکن و هم از ویژگی‌های یک جنگنده برخوردار باشند تا بتوان از آنها در مجموعه‌ای از مأموریت‌ها استفاده کرد. بنابراین، تحقیق و پژوهش پیرامون بال‌های مورفینگ مورد نیاز است. امروزه، بسیاری از بال‌های قدیمی با به کارگیری و فعال‌سازی



شکل ۱- نمای از هواپیمای F/A-18 با AAW [۳]

ابتدا تاریخچه مختصری از هواپیماهای کنونی که برای کارهای مختلف شکل بال‌های خود را تغییر می‌دهند، ارائه می‌شود. به دلیل پیشرفت‌های فناوری، مهندسان از نظر طراحی بال‌های هواپیما از طراحی‌های سنتی فراتر رفته‌اند. این بال‌ها بسته به نوع کاری که باید انجام دهند، شکل خاصی به خود می‌گیرند. در سال ۱۹۰۳ برداردن رایت (Wright) از نوعی سامانه کنترل برای بال‌ها استفاده کردند که امکان چرخش بال را فراهم می‌کرد. این موضوع، امکان کنترل هواپیما را به نحو بهتری میسر می‌ساخت. در آزمایشگاه تحقیقات نیروی هوایی، تیم فانتوم بوئینگ (Boeing's Phantom) و ناسا درایدن (NASA Dryden) با درک این نکته که امکان چرخش بال‌ها باعث ایجاد قابلیت مانور بیشتری می‌شود، با یکدیگر همکاری کرده و برنامه‌ای با عنوان برنامه بال‌های هواکشسان فعال (Active Aeroelastic Wing, AAW) را تدوین کردند. همکاری آنها منجر به طراحی و توسعه F/A-18A شد که از قابلیت ایجاد چرخش تا پنج درجه در دیواره‌های بیرونی بال‌ها برخوردار بود. اولین پرواز در تاریخ ۱۵ نوامبر ۲۰۰۲ در پایگاه نیروی هوایی ادواردز در کالیفرنیا انجام گرفت.

یکی دیگر از مراکز که در پژوهش‌های مربوط به بال‌های مورفینگ شرکت داشته است، مرکز پژوهشی لانگ لی (Langley) ناساست. پژوهشگران این مرکز یا LaRC در حال مطالعه و پژوهش روی پرندگان هستند تا به راز قابلیت مانور زیاد آنها پی ببرند. پرندگان در مقایسه با هواپیماها از قابلیت مانور بسیار بیشتری برخوردارند. پژوهشگران LaRC همه اجزای حیاتی در هواپیماهای مورفینگ را شامل ساختارها، فیزیک جریان، سامانه‌ها و بهینه‌سازی‌های چندجانبه، کنترل‌های یکپارچه، آکوستیک و مواد را بررسی کرده‌اند [۱].

در حال حاضر، چهار هواپیمای مدرن وجود دارد که از مزایای بال‌های تغییر شکل دهنده برخوردارند. بال‌های F-14 تامکت (Tomcat) و B-1B لنسر (Lancer) با استفاده از فناوری بال نوسانی با قابلیت تغییر سویب طراحی شده‌اند. بال‌ها برای پرواز مافوق صوت به عقب رانده می‌شوند و در زمان حرکت در سرعت‌های زیاد، باعث بهبود کاربری و کنترل می‌شوند. بال AFTI/F-111 (MAW) و FIA/18A هرنت (Hornet) با بال‌های هواکشسان فعال با انحنای منحصر به فردی طراحی شده‌اند. این طراحی باعث می‌شود تا هواپیما مانورپذیری و سرعت بیشتر و نیز نسبت بالابری به کشش بهتر و مداومت پروازی بیشتری داشته باشد [۲].

همان‌گونه که در بالا ذکر شد، در طراحی بال‌های تغییر شکل



شکل ۴- بال با انحنا متغیر: حالت عادی طرح انحنا بال (سمت چپ) و انحنا ایجاد شده در بال (سمت راست) [۴].

بسته به عملیات پروازی تغییر می‌یابد. تغییر انحنا مانند فلپ عمل می‌کند و باعث می‌شود که بال در حین حرکت با سرعت زیاد، کمترین آثار پسا را داشته باشد. در عین حال در سرعت‌های کم، نیروی برا (lift) افزایش می‌یابد. بال‌های دارای طراحی غیرمسطح، یک مولفه سرعت القایی دارند. همچنین، افزایش سرعت در افزایش نیروی برا در یک مقدار پسای مشخص موثر است.

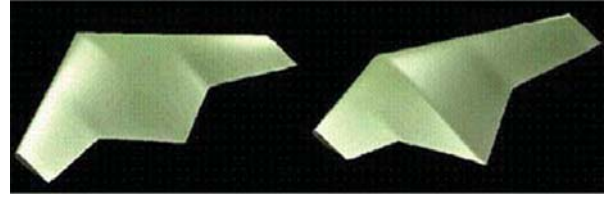
یک قابلیت مورفینگ متفاوت که می‌تواند پسا را به حداقل برساند، بال رفلکس است که نمایی از آن در شکل ۵ نشان داده شده است. طراحی بال رفلکس (برگشته) مورفینگ می‌تواند کارایی هواپیما را افزایش دهد.

آخرین قابلیت تغییر شکل بال، قابلیت پیچش آن مطابق شکل ۶ است که پیشتر درباره F/A-18A AAW بحث شد. با این قابلیت، دیواره‌های بیرونی بال امکان چرخش تا پنج درجه را می‌یابند. فلیک (Flick) [۵]، درباره AAW اظهار کرده است که برترین سطوح کنترل لبه، سطوح انحنایافته‌اند. آنها باعث تغییر در توزیع فشار آیرودینامیک بر سطح بال شده و موجب پیچش و دوران آن می‌شوند. سطوح به‌گونه‌ای دچار تغییر شکل می‌شوند که بال شکل مطلوب را به خود بگیرد. در این حالت، بال در مقایسه با شرایطی که هیچ‌گونه قابلیت مورفینگ ندارد، عملکرد بهتری نشان می‌دهد.

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی در ارتباط با به‌کارگیری پوسته‌ها و مواد مختلف به عنوان پوشش سازه‌های مورفینگ انجام گرفته است. از جمله می‌توان به استفاده از هسته‌های لانه زنبوری اشاره کرد که توسط گاندی (Gandhi) و همکاران [۶]



شکل ۵- یک بال مورفینگ با پیکربندی‌های انعکاسی متفاوت [۴].



شکل ۲- بال مورفینگ با ویژگی‌های سویپ متغیر: طرح میانی (سمت چپ) و طرح با حداکثر مقدار سویپ (سمت راست) [۴].

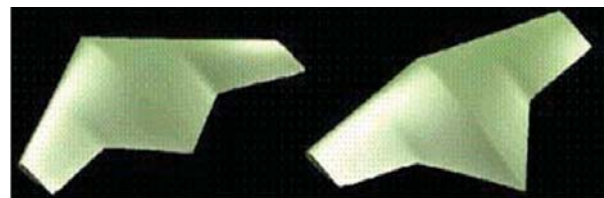
فلپ‌های لولادار، دچار تغییر شکل می‌شوند. حتی در هواپیماهایی که قبلاً در باره استفاده از سامانه تغییر شکل بال در آنها بحث شد، شکل بال با استفاده از یک ضامن یا سامانه‌های اهرم و لولا تغییر داده می‌شود. فلپ‌ها به‌طور جداگانه ساخته شده و سپس به بال افزوده می‌شوند، به‌طوری که فلپ‌ها و بال‌ها اجزای جداگانه‌ای را تشکیل می‌دهند. مواد استفاده شده در پوسته، سخت بوده و معمولاً نوعی از ورقه‌های نازک فلزی هستند. به عنوان مثال، شکل ۱ یک F/A18 را با بال هواکشسان فعال (AAW) نشان می‌دهد.

یک بال مورفینگ می‌تواند به‌گونه‌ای طراحی شود که بتواند چند شکل و ترکیب مختلف را به خود بگیرد. از قابلیت‌های تغییر شکل بال شامل سویپ متغیر در شکل ۲ نشان داده شده است.

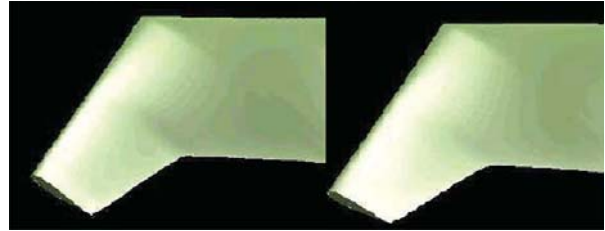
انحنای بال به عقب، باعث بهبود بازدهی شده و در مقایسه با یک بال مسطح فاقد انحنا و دارای شکل بیضوی که در نظریه کلاسیک طراحی بال به عنوان طرح مطلوب شناخته می‌شود، کارایی بیشتری دارد. یکی دیگر از قابلیت‌های یک بال مورفینگ، تغییر موضع زاویه بال (زاویه دووجهی) است. این پیکربندی بال در شکل ۳ دیده می‌شود.

برخی بر این باورند که طول بیشتر بال می‌تواند پسا (drag) را تغییر دهد، اما افزایش طول بال ضمن ثابت بودن مساحت بال، وزن بال را با توجه به بیشتر بودن ممان خمشی وارد بر آن و نازک‌تر بودن ساختار، دچار افزایش می‌کند. در طراحی یک بال مورفینگ با توجه به کاربرد هواپیما، ملاحظات در نظر گرفته می‌شود.

از قابلیت‌های تغییر شکل که باید مدنظر قرارگیرد، انحنا بال است. همان‌گونه که در شکل ۴ نشان داده شده است، شکل انحنا



شکل ۳- بال مورفینگ با دووجهی متغیر: طرح میانی بال (سمت چپ) و تغییر دووجهی (سمت راست) [۴].



شکل ۶- یک بال مورفینگ در حالت پیچش [۴].

بررسی شده است. آنها دریافتند، با استفاده از این مواد می‌توان به کرنش‌هایی بیش از ۱۰ برابر ماده اصلی دست یافت. کیل (Keihl) و همکاران [۷] نشان دادند، پلیمرهای حافظه‌دار قابلیت‌های مناسبی را برای استفاده در این فناوری دارند، به طوری که قابلیت پذیرش تغییر شکل‌های زیاد را دارند. در عین حال این پلیمرها با سرد کردن می‌توانند نیروهای زیادی را تحمل کنند. بوبرت (Bubert) و همکاران [۸]، یک لایه متشکل از الیاف و الاستومر را بررسی کردند. آنها به طور تجربی نشان دادند، این ترکیب تحت نیروی کششی تک‌محوری، حدود ۱۰۰ درصد تغییر شکل می‌دهد. نتایج مربوط به آزمون‌های خارج از صفحه نشان داد که می‌توان در شرایط مختلف تغییر سطح مقطع به تغییر شکل خارج از صفحه کمتر از mm ۲/۵ دست یافت. همچنین کو (Khoo) و همکاران [۹]، سامانه‌های مدولار الاستومری را به عنوان پوسته ثانویه ارزیابی کرده‌اند. پوسته ثانویه سبب کارایی بهتر سازه در شرایط محیطی مختلف می‌شود.

انتخاب مواد

مقدمه‌ای بر الزامات مواد استفاده شده

همان‌گونه که در بخش پیش بحث شد، مواد استفاده شده در فناوری مورفینگ نمی‌توانند دارای صلیبیت زیادی باشند. یک ماده مناسب برای پوسته باید انعطاف‌پذیری داشته باشد، به گونه‌ای که بتواند به آسانی دچار تغییر شکل شده و در عین حال بتواند بارهای آیرودینامیک وارد بر هواپیما را تحمل کند. همچنین، ماده مزبور باید در برابر عوامل ساینده و شرایط محیطی مقاوم باشد. پس از تغییر شکل، ماده به حالت ثانویه باید قابلیت برگشت به حالت اولیه خود را نیز داشته باشد. در شرایط وجود ماده اضافی در پوسته بال، پس از برگشت پوسته به حالت اولیه احتمال وجود تغییر شکل پلاستیک در آن به وجود می‌آید. این مواد مازاد سبب ایجاد پسا در بال می‌شوند و در نتیجه عملکرد هواپیما افت می‌کند. این شرایط، اساس پژوهش پیرامون مواد مناسب برای پوسته‌های مورفینگ را تشکیل می‌دهد.

مواد مهندسی

گسترش مواد پیشرفته مهندسی در زمینه پلیمرها امکان ساخت مواد بادوام، انعطاف‌پذیر، کشسان و برخوردار از درصد بازیابی زیاد را فراهم کرده است. با توجه به این پیشرفت‌ها، مواد مختلفی وجود دارد که می‌توان از آنها به عنوان جنس پوسته قطعات مختلف بال‌های مورفینگ استفاده کرد. به‌ویژه اینکه مواد مزبور را می‌توان در نقاطی به کار گرفت که بال دچار تغییر شکل می‌شود. از مواد ممکن برای اینگونه پوسته‌ها پلی‌یورتان است. یکی از مواد مشابه با پلی‌یورتان، کوپلی‌استر است. کوپلی‌استر ماده‌ای است که می‌تواند به آسانی آن را فراوری کرد و خواص الاستومرهای گرماسخت را نیز داراست [۱۰]. از دیگر مواد مناسب، موادی موسوم به مواد حافظه‌دار هستند که در دماهای بیشتر از یک دمای خاص دچار تغییر شکل‌های عمده‌ای می‌شوند. این دما را دمای گذار شیشه‌ای یا T_g می‌نامند. در کمتر از این دما، ماده یاد شده سخت می‌شود و در بیش از آن، مانند یک لاستیک انعطاف‌پذیر است. ماده دیگری که ارزیابی می‌شود، گروه مواد بافته شده با قابلیت انبساط مانند اسپندکس (Spandex) هستند. این مواد دارای خواص کشسانی بوده و از قابلیت بازیابی زیادی برخوردارند.

پلی‌یورتان

از مواد به کار رفته در این فناوری، پلی‌یورتان است که در دهه ۱۹۳۰ توسط Otis Bayer اختراع شد. بر اساس گزارش شرکت Bunker، پلی‌یورتان به عنوان جایگزین لاستیک در نظر گرفته شد، زیرا طی جنگ جهانی دوم لاستیک با کمبود تولید مواجه بود [۱۱]. پس از چند سال پیشرفت در زمینه مهندسی شیمی، اکنون پلی‌یورتان در انواع مختلف برای کاربردهای گوناگون در بازار تجارت عرضه می‌شود. پلی‌یورتان می‌تواند قابلیت ارتجاعی لاستیک را داشته باشد و در عین حال از مزایای سختی، استحکام و دوام فلز نیز برخوردار باشد. از آنجا که پلی‌یورتان ماده‌ای مصنوعی است، فرمول‌های شیمیایی مختلفی وجود دارد که باعث ایجاد سختی‌های مختلفی در پلی‌یورتان می‌شود. شکل ۷ محدوده سختی سنجی را نشان می‌دهد. معمولاً پلی‌یورتان از سختی بین shore A ۱۰۰-۳۰ و shore D ۷۵-۲۰ برخوردار است.

از سایر مزایای پلی‌یورتان می‌توان به مقاومت آن در برابر فرسایش و دوام آن در برابر بار فشاری اشاره کرد. پلی‌یورتان در برابر روغن‌ها، حلال‌ها، چربی‌ها، گریس‌ها و بنزین مقاوم است. این پلیمر را می‌توان با توجه به فرمول‌های شیمیایی مختلف برای تحمل بارگذاری‌های گوناگون طراحی کرد.

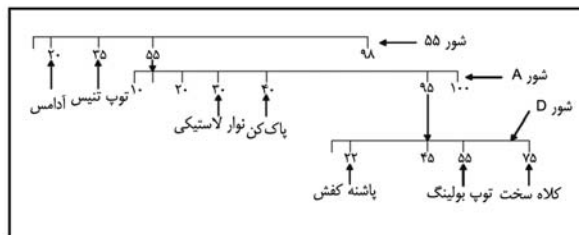
مورفینگ را تأمین می‌کنند. برخی از این مواد عبارتند از: EG-39A، EG-80A و EG100P که خواص آنها در جدول ۱ آورده شده است.

کوپلی‌استر

دو ماده خاص وجود دارند که در زمره کوپلی‌استرها قرار می‌گیرند و در این پژوهش بررسی شده‌اند. یکی از این مواد آرنیتل (Arnitel) و دیگری رایت-فلکس (Riteflex) است. این مواد نوعی گرمانرم‌اند. از دلایل انتخاب این مواد در دسترس بودن آنهاست. طبق گزارش ماهانه شرکت سازنده، رایت-فلکس تلفیقی از خواص الاستومرها و گرماسخت‌ها را دارد و ویژگی‌های فراوری آسان مواد پلاستیکی را نیز داراست [۷].

ساختار مولکولی رایت-فلکس به گونه‌ای است که می‌تواند درجات سختی مختلفی را با توجه به درصد فاز نرم و سخت داشته باشد. هدف اصلی از طراحی رایت-فلکس تهیه موادی با قابلیت‌هایی برتر نسبت به سایر الاستومرهاست.

آرنیتل، یک الاستومر کوپلی‌استر است که توسط DSM تولید می‌شود. آرنیتل، بسیاری از خواص پلی‌یورتان را داراست و ضمن برخورداری از مزایای مواد گرمانرم مهندسی به آسانی از خواص مکانیکی بسیار عالی نیز برخوردار است. همچنین، ماده مزبور از



شکل ۷- مقیاس سختی سنجی [۱۲].

از آنجا که هواپیما در مرحله عملیاتی تحت شرایط آب و هوایی مختلف قرار می‌گیرد، جنس پوسته باید در برابر این شرایط مقاومت کافی داشته باشد. پلی‌یورتان در برابر اکسیژن و نور خورشید نیز مقاوم است. خواص کشسانی پلی‌یورتان ناشی از آنتروپی است. زنجیرهای پلیمری که پلی‌یورتان را می‌سازند، باعث می‌شوند حالت انبساط نیافته جزو ویژگی‌های ذاتی آن باشد. با توجه به اینکه زنجیرهای پلیمری در حالت طبیعی بی‌نظم هستند، زمانی که این ماده تحت کشش قرار می‌گیرد، می‌تواند به حالت اولیه خود برگردد. تکوفلکس (Tecoflex)، نوعی پلی‌یورتان گرمانرم پزشکی است که توسط شرکت Thermedics Polymer تولید می‌شود [۶]. بر اساس گزارش این شرکت، مواد تکوفلکس بیشتر در زمینه‌های پزشکی به کار می‌روند و دارای ویژگی‌های مختلفی هستند. برخی از این ویژگی‌ها، شرایط مورد نیاز پوسته مورد استفاده در بال‌های

جدول ۱- ویژگی‌های برخی از انواع تکوفلکس [۱۳].

| EG-72A | EG-68A | EG-65A | EG-60A | EG-100A | EG-93A | EG-85A | EG-80A | ASTM | ویژگی |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|---------------------------------------|
| ۶۷ | ۶۳ | ۶۰ | ۵۱ | ۹۴ | ۸۷ | ۷۷ | ۷۲ | D 2240 | سختی (شور A) |
| ۱/۱ | ۱/۱ | ۱/۱ | ۱/۰۹ | ۱/۰۹ | ۱/۰۸ | ۱/۰۵ | ۱/۰۴ | D 792 | گرانش ویژه |
| ۹۲۰۰۰ | ۴۶۰۰۰ | ۳۷۰۰۰ | ۱۳۰۰۰ | ۱۰۰۰۰ | ۳۲۰۰ | ۲۳۰۰ | ۱۰۰۰ | D 790 | مدول خمشی (psi) |
| ۸۱۰۰ | ۸۳۰۰ | ۸۳۰۰ | ۸۳۰۰ | ۸۲۰۰ | ۷۷۰۰ | ۶۲۰۰ | ۵۸۰۰ | D 412 | کشش نهایی (psi) |
| ۳۱۰ | ۳۶۰ | ۳۶۰ | ۳۶۰ | ۳۷۰ | ۳۹۰ | ۵۵۰ | ۶۶۰ | D 412 | تغییر شکل نهایی (%) |
| ۳۴۰۰ | ۲۶۰۰ | ۲۲۰۰ | ۱۸۰۰ | ۱۶۰۰ | ۱۰۰۰ | ۶۰۰ | ۳۰۰ | D 412 | کشش ۱۰۰٪ (psi) |
| ۴۸۰۰ | ۳۷۰۰ | ۳۰۰۰ | ۲۹۰۰ | ۳۰۰۰ | ۱۹۰۰ | ۹۰۰ | ۵۰۰ | D 412 | کشش ۲۰۰٪ (psi) |
| ۷۱۰۰ | ۶۳۰۰ | ۶۰۰۰ | ۵۶۰۰ | ۵۶۰۰ | ۴۳۰۰ | ۱۴۰۰ | ۸۰۰ | D 412 | کشش ۳۰۰٪ (psi) |
| ۴ | ۳/۵ | ۳/۸ | ۳/۴ | ۴/۸ | ۵/۳ | ۴ | ۳/۵ | D 1238 | شاخص جریان مذاب، وزن g ۲۷/۶ (g/10min) |
| (۱۷۵°C) | (۱۷۵°C) | (۱۷۵°C) | (۱۷۵°C) | (۱۷۵°C) | (۱۷۰°C) | (۱۶۵°C) | (۱۷۵°C) | | |
| -۰/۰۰۶ | -۰/۰۰۸ | -۰/۰۰۸ | -۰/۰۰۸ | -۰/۰۰۸ | -۰/۰۱۰ | -۰/۰۱۰ | -۰/۰۱۲ | D 955 | انقباض قالب |
| ۰/۰۰۴ | ۰/۰۰۴ | ۰/۰۰۴ | ۰/۰۰۴ | ۰/۰۰۴ | ۰/۰۰۶ | ۰/۰۰۶ | ۰/۰۰۸ | | |

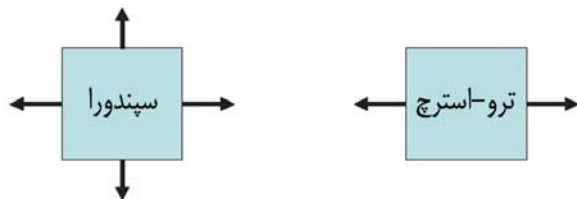


شکل ۹- الیاف الاستن و اسپندکس [۱۸].

صلب عمل می‌کند و طی مرحله گذار، حالت لاستیکی و جامد را تجربه می‌کند. در دمای بیش از این دما به شکل لاستیک در می‌آید که امکان ایجاد تغییر شکل در ماده را فراهم می‌سازد [۱۶]. SMPهای ساخته شده از پلی‌یورتان به دلیل قابلیت خود جهت‌گیری در فرایند قالب‌گیری تزریقی نیز مورد توجه قرار گرفته‌اند. از سوی دیگر، این مواد قابلیت رنگ‌پذیری نیز دارند و امکان تنظیم دمای گذار نیز در باره آنها وجود دارد. ذکر این نکته مهم است که کلیه پلیمرها دارای یک دمای گذار شیشه‌ای هستند، اما همه پلیمرها خاصیت حافظه‌دار بودن از خود بروز نمی‌دهند.

مواد بافته

آخرین مواد مورد بررسی، از الیاف با رشته‌های الاستن (Elastane) ساخته شده‌اند. این رشته‌های مصنوعی از پلی‌یورتانی تهیه می‌شوند که متشکل از قطعات سخت پلی‌یورتان و قطعات نرم پلی‌اتر یا پلی‌استر است [۱۷]. الیاف الاستن جزو خانواده الیافی هستند که معمولاً تحت عنوان اسپندکس شناخته می‌شوند (شکل ۹). این الیاف هم از نظر انعطاف‌پذیری زیاد و هم از نظر قابلیت بازیابی خوب، شهرت دارند. دو نوع از این مواد بیشترین کاربرد را در فناوری مورفینگ دارند: اسپندورا (Spandura) و ترو-استرچ (Tru-Stretch) که توسط شرکت وارشو و پسران (H. Warshaw & Sons) ساخته می‌شوند. اسپندورا، یکی از محصولات دوپونت است که از ترکیب کوردورا (Cordura) و لیکرا (Lycra) ساخته می‌شود. طبق گزارش شرکت Seattle



شکل ۱۰- تفاوت میان خاصیت کشسانی سپندورا و ترو-استرچ [۹].

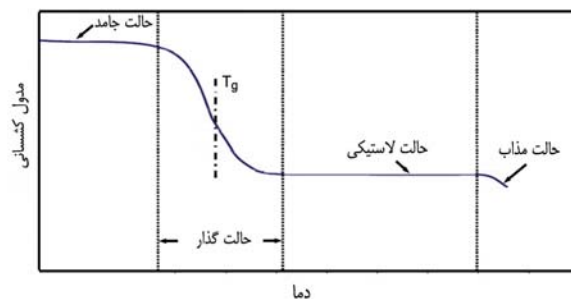
انعطافی برابر با لاستیک‌ها بهره‌مند است. آرنیتل دارای خواصی نظیر استحکام، مقاومت در برابر فرسایش، مقاومت در برابر گرما و مواد شیمیایی است که در پلی‌یورتان نیز وجود دارد.

مواد حافظه‌دار

مواد حافظه‌دار (shape memory materials, SMM) دسته دیگری از مواد مناسب برای به‌کارگیری در فناوری مورفینگ هستند. این مواد دارای انواع گوناگونی نظیر پلیمرهای حافظه‌دار (shape memory polymer, SMP)، آلیاژهای حافظه‌دار (shape memory alloy, SMA) و الاستومرهای بلورمایع (liquid crystalline elastomers, LCE) هستند. لوی و همکاران نشان دادند، SMMها موادی هستند که در شرایط ویژه دما و تنش، دچار تغییر شکل موقت می‌شوند. سپس این مواد در شرایط گرمایی، الکتریکی یا عوامل محیطی و به دلیل انرژی ارتجاعی که طی تغییر شکل اولیه در خود ذخیره کرده‌اند، به حالت اولیه خود باز می‌گردند [۱۴]. الاستومرهای بلورمایع دارای خواص ناهمسانگردی مکانیکی هستند و خواص عمومی مورد نیاز برای پوسته بال‌های مورفینگ را برآورده می‌سازند.

پلیمرهای حافظه‌دار دارای خواص مشابه با لاستیک‌ها هستند. اما از آنجا که زنجیرهای پلیمری به شکل شیمیایی و فیزیکی در پلیمرها ایجاد می‌شوند، پلیمرهای حافظه‌دار دارای انعطاف‌پذیری بسیار زیادی در دماهای بیش از دمای بحرانی (که به وسیله دمای شیشه‌ای شدن کنترل می‌شود) هستند [۱۵]. این پدیده امکان تغییر شکل مواد را نسبت به دما فراهم می‌سازند. شکل ۸ منحنی تغییرات مدول کشسانی را در برابر دما برای یک پلیمر حافظه‌دار نشان می‌دهد [۱۶-۱۸].

پلیمرهای حافظه‌دار پلی‌یورتانی دارای مزایای مربوط به دمای گذار شیشه‌ای هستند، در حالی که خواص مکانیکی ماده تغییر می‌یابد. در دماهای کمتر از دمای شیشه‌ای، این ماده مانند یک ماده



شکل ۸- منحنی تغییرات مدول کشسانی در برابر دما [۹].

جدول ۲- مقایسه خواص مکانیکی مواد استفاده شده در پوسته‌های مورفینگ [۱۳].

| مدول یانگ بیشینه (MPa) | مدول یانگ کمینه (MPa) | کرنش بازیابی (بدترین) | نیروی بیشینه (Lbs) | کرنش بیشینه | مواد |
|------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|-------------|-------------------------|
| ۲/۰۱ | ۱/۰۷ | ۰/۱۸۲ | ۱۵/۹۱ | ۳/۰۷ | Tecoflex® 80A |
| ۲۰/۲ | ۱۰/۳ | ۰/۱۲۲ | ۲۸/۸۶ | ۱/۴۴ | Tecoflex® 100A |
| ۹/۷۸ | ۶/۱۰ | ۰/۲۳۵ | ۱۷۸/۲۳ | ۱/۹۳ | Tecoflex® 93A |
| ۳۵/۸ | ۹/۲۰ | ۰/۷۸۸ | ۲۱/۲۸ | ۲/۲۰ | Riteflex® 640A |
| ۷۷/۱ | ۱۶/۳ | ۰/۹۵۰ | ۲۱/۹۷ | ۱/۲۸ | Riteflex® 663A |
| ۲۳/۵ | ۷/۶۱ | ۰/۱۳۹ | ۸۷/۳۶ | ۱/۵۱ | Arnitel® |
| ۰/۳ | ۰/۰۷ | ۰/۱۶۷ | ۱۱/۰۹ | ۲/۰۰ | پلیمرهای حافظه شکلی |
| ۲۴/۰ | ۰/۲۳ | ۰/۳۴۲ | ۲۲۲/۸۷ | ۰/۸۷ | Spandura® |
| ۹۳/۲ | ۸۶/۲ | ۰/۰۷۳ | ۲۵۰/۰۰ | ۰/۲۳ | Tru-Stretch® (محکم‌باف) |
| ۲۴/۵ | ۳/۴۹ | ۰/۳۱۷ | ۲۴۱/۹۱ | ۰/۸۶ | Tru-Stretch® (شل‌باف) |

بیش از ۱۰۰ درصد هستند. این مقدار در Tecoflex 80A به ۳/۰۸ (بیش از ۳۰۰ درصد) می‌رسد که برای تغییر شکل‌های زیاد مناسب است. همچنین، این گونه مواد دارای مدول یانگ کمی بوده و از طرفی اسپندورا و ترو-استرچ دارای بیشترین قابلیت تحمل بارهای اعمالی و نیروهای ایرودینامیکی هستند (مناسب برای شرایط بد پروازی و مانورهای ناگهانی). از این رو می‌توان با توجه به نوع کارکرد سازه، نیروهای وارد شده و انتظار طراح از سازه ماده مناسب را انتخاب کرد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مواد مختلفی، که پتانسیل به‌کارگیری در فناوری مورفینگ را دارند، ارزیابی شده و با هم مقایسه شده‌اند. به‌طور کلی می‌توان گفت، پلی‌یورتان‌های گرمانرم، الاستومر کوپلیمر، پلیمرهای حافظه‌دار و مواد بافته شده قابلیت استفاده در این فناوری را دارند. از طرفی، مواد با سفتی زیاد و با انعطاف‌پذیری کم، مواد مناسبی نیستند. همچنین، قابلیت برگشت به حالت اولیه نیز از خواص مهم و حیاتی برای مواد استفاده شده در فناوری مورفینگ است.

Fabrics سازنده و تامین کننده اسپندورا است. این محصول دوام نایلون کوردورا و قابلیت کشش لیکرا را دارد. طبق گزارش سایت لیکرا، این ماده نیز دارای قابلیت حفظ شکل است. بدین معنا که اسپندورا پس از انبساط، مجدداً شکل خود را بازیابی‌اند. سایت کوردورا اعلام کرد که کوردورا، دو برابر مقاوم‌تر از برزنت، سه برابر محکم‌تر از پلی‌استر استاندارد و دو برابر با دوام‌تر از نایلون استاندارد در برابر فرسایش و خراشیدگی و همچنین ایجاد پارگی است [۱۹].

ترو-استرچ از ترکیب لیکرا و نایلون ساخته می‌شود. این ماده دارای خواص عمده اسپندورا است. تنها تفاوت بین ترو-استرچ و اسپندورا این است که اسپندورا در کلیه جهات حالت ارتجاعی دارد در حالی که ترو-استرچ فقط در یک جهت خاصیت کشسانی دارد. دلیل این تفاوت در نوع بافت مواد و همچنین ترکیب شیمیایی رشته‌هاست. شکل ۱۰ تفاوت میان این دو ماده را نشان می‌دهد.

در ادامه به مقایسه خواص مکانیکی مواد مختلف استفاده شده در فناوری مورفینگ به‌عنوان پوسته پرداخته شده است. در جدول ۲ نتایج تجربی مربوط به مواد مختلف آمده است. همان گونه که از نتایج تجربی برمی‌آید، بیشتر مواد پلیمری استفاده شده در فناوری مورفینگ، بنابر ویژگی‌های منحصر به فرد مورد نیاز، دارای کرنش‌هایی

مراجع

1. Bowan M., Anna-Maria R., Lucas G., Joycelyn S., and David L., Research Activities within NASA's Morphing Program, *Proceedings of the NATO-RTO Workshop on Structural Aspects of Flexible Aircraft Control*, Ottawa, Canada, 18-21 October, 1999.
2. Arrison L., Birocco K., Gaylord C., Herndon B., Manion K., and Metheny M., 2002-2003 AE/ME Morphing Wing Design, Senior Design Final Report, Virginia Tech, 1 May 2003.
3. Chakraborty A., Seiler P., and Balas G.J., Susceptibility of F/A-18 Flight Controllers to the Falling-Leaf Mode: Linear Analysis, *J. Guidance Control Dynamic.*, **34**, January-February, 2011.
4. Pettit G., Pictures Captured from a Movie Showing Different Morphing Wing Configurations, Center for Intelligent Materials Systems and Structures, Virginia Tech, Blacksburg, Virginia, 2001.
5. Flick P., News@:, Volume III, Issue 11. 13. Available: <http://www.afrl.af.mil/news/nov02>, available in October 2003.
6. Olympio K.R. and Gandhi F., Flexible Skins for Morphing Aircraft Using Cellular Honeycomb Cores, *J. Intelligent Mater. Sys. Struct.*, **21**, 1719-1735, November 2010.
7. Keihl M.M., Bortolin R.S., Sanders B., Joshi S., and Tidwell Z., Mechanical Properties of Shape Memory Polymers for Morphing Aircraft Applications, *Proc. SPIE 5762, Smart Structures and Materials 2005: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies*, 143, June 2005.
8. Bubert A.E., Woods B.K.S., Lee K., Kothera C., and Wereley N.M., Design and Fabrication of a Passive 1D Morphing Aircraft Skin, *J. Intelligent Mater. Sys. Struct.*, **21**, 1699-1717, November 2010.
9. Khoo C.K., Salim F., and Burry J., Designing Architectural Morphing Skins with Elastic Modular Systems, *Int. J. Architect. Comput.*, **09**, 397-419, June 2011.
10. Ma H., *Structure Property Relationships in Copolyester Fibers and Composite Fibers*, PhD Thesis, School of Chemistry and Biochemistry, Georgia Institute of Technology, May, 2004.
11. http://www.bunkercorp.com/pages/hypr_fx.htm, available in 14 October 2003
12. Kikuta M.T., *Mechanical Properties of Candidate Materials for Morphing Wings*, MS Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Mechanical Engineering, December 11, 2003.
13. <http://www.thermedicsinc.com/english/en/products/medical/med1>.
14. Changdeng L., Rousseau I.A., Qin H., and Mather P.T., Tailored Shape Memory Polymers: Not all SMPs are Created Equal, *Proceedings of The First World Congress on Biomimetics*, Albuquerque, New Mexico, 1-7, December 9-11, 2002.
15. Chen W., Chengye Z., and Xuerong Gu, Thermosetting Polyurethanes with Water- Swollen and Shape Memory Properties, *J. Appl. Polym. Sci.*, **94**, 1504-1512, 2002.
16. Hayashi S., Lin P.H., and Tobushi H., Deformation Properties of Polyurethane Shape Memory Polymers, *Proceedings of the First International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies*, Pacific Grove California, 109-114, 1994.
17. Gaymans R.J., Krijgsman J., and Niesten M.C.E., Melt Spinnable Elastane (Spandex) Fibers from Segmented Copolyether Esteraramids, *Chem. Fiber. Int.*, **50**, 257-260, 2000.
18. <http://www.topvaluefabrics.com>, available in November 2012.
19. <http://www.invista.com/lycra.html>, available in 11 October 2003.