

مروری بر روش‌های تحریک حرارتی عملگرهای گرمافعال پلیمری تابیده و ماریچ شده

محمدامیر بخشی^۱، علی معظمی گودرزی^{*}، فتانه مرشد سلوک^۲

۱ بابل، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، دانشکده مهندسی مکانیک، گروه طراحی جامدات

۲ بابل، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، دانشکده مهندسی مکانیک، گروه مهندسی دریا

چکیده ...

اخیراً نوع جدیدی از ماهیچه‌های مصنوعی به نام عملگرهای گرمافعال پلیمری تابیده و ماریچ شده توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. این عملگرها عمدتاً از نخ ماهیگیری یا نخ نساجی ساخته می‌شوند و به هنگام تحریک حرارتی می‌توانند در راستای طول خود منقبض شده و جابه‌جایی خطی تولید کنند. هزینه تولید پایین، عملکرد بی‌صدا، نسبت قدرت به وزن بالا و توانایی تولید جابه‌جایی‌های بزرگ در پاسخ به محرک حرارتی از جمله مزیت‌هایی هستند که باعث شده این عملگرها نسبت به عملگرهای مرسوم موجود بیشتر مورد توجه قرار گیرد و به گزینه‌ای مناسب برای استفاده در کاربردهای مختلفی نظیر رباتیک، منسوجات هوشمند، سامانه‌های کسب انرژی و ... تبدیل شوند. این عملگرها با استفاده از خاصیت انبساط و انقباض الیاف پلیمری به هنگام تغییر دما که در ابتدا توسط یک موتور الکتریکی تابیده شده و سپس به صورت ماریچ در می‌آیند، کار می‌کنند. روش ساخت فوق باعث افزایش قدرت و کارایی آن‌ها می‌شود. به علاوه، این عملگرها می‌توانند در محیط‌های گوناگون، از جمله زیر آب و در دماهای بالا، عملکرد خود را حفظ کنند. این مطالعه مروری به بررسی روش‌های ساخت، روابط حاکم و روش‌های تحریک حرارتی این عملگرها پرداخته و کاربردهای جدید و نوآورانه آن‌ها را نیز بیان می‌کند.

واژه‌های کلیدی:

عملگر،
گرمافعال،
تابیده و ماریچ شده،
نخ ماهیگیری،
تحریک حرارتی

*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:

goudarzi@nit.ac.ir

۱ مقدمه

ماهیچه مصنوعی (Artificial Muscle) نوعی عملگر است که می‌تواند مانند ماهیچه‌های اسکلتی با استفاده از محرک‌های خارجی فیزیکی یا شیمیایی نظیر گرما، رطوبت، جریان الکتریکی، فشار، نور و غیره، منقبض و منبسط شده، کار مکانیکی تولید کند [۱، ۲]. انواع مختلفی از ماهیچه‌های مصنوعی بر اساس سازوکار آن‌ها وجود دارد که مهم‌ترین آن‌ها ماهیچه‌های مصنوعی نیوماتیک، آلیاژهای حافظه‌دار (Shape Memory Alloys)، پلیمرهای حافظه‌دار (Shape Memory Polymers) و ماهیچه‌های مصنوعی بر مبنای الیاف تابیده و مارپیچ شده است.

ماهیچه‌های مصنوعی نیوماتیک توانایی تولید حرکت خطی از طریق تبدیل فشار هوا به حرکت مکانیکی را دارند. این ماهیچه‌ها می‌توانند نیرویی تا ۶ کیلو نیوتن تولید کنند؛ کرنش خروجی ۲۵٪ فراهم کنند و چگالی قدرتی نزدیک به ۲۲ وات بر گرم داشته باشند که از برجسته‌ترین ویژگی‌های آن‌ها است [۳]. به دلیل این ویژگی‌ها، این نوع ماهیچه‌ها قابلیت استفاده در طیف وسیعی از کاربردها، از جمله ربات‌های نرم را دارند [۴].

آلیاژهای حافظه‌دار برای اولین بار توسط آرنه اولاندر در سال ۱۹۳۲ کشف شدند [۵]. بوهلر و وانگ مشاهده کردند که آلیاژ نیکل تیتانیوم هنگامی که تحت بار و گرما قرار می‌گیرد، اثری حافظه‌ای از خود نشان می‌دهد. به همین دلیل، آلیاژهای حافظه‌دار اهمیت بیشتری پیدا کردند. به طور کلی، اثر حافظه شکلی به عنوان ویژگی عملگرها در تغییر شکل موقت و بازگشت به شکل اولیه خود هنگام تحریک توسط محرک‌های خارجی تعریف می‌شود [۶].

در پلیمرهای حافظه‌دار، اثر حافظه شکلی را می‌توان از طریق تنش کششی، افزایش طول کششی و تغییر دما در طول چرخه‌های ترمودینامیکی نشان داد. به دلیل این خواص، آلیاژها و پلیمرهای حافظه‌دار قابلیت کاربرد در ربات‌های زیست‌تقلیدی، دست‌های رباتیک، اسکلت‌های رباتیک و وسایل پزشکی را دارند [۷].

در سال ۲۰۱۴، هاینس و همکاران، جایگزین مناسب‌تر و ارزان‌تر با عملکرد بهتری نسبت به عملگرهای گران‌قیمت موجود معرفی کردند. این عملگر یا ماهیچه مصنوعی از تاباندن و مارپیچ شدن الیاف پلیمری ساخته شده بود که عمدتاً از نایلون ۶،۶، نایلون ۶،۶ و پلی‌اتیلن تهیه شده‌اند و به راحتی به صورت نخ‌های نساجی و نخ ماهیگیری در دسترس هستند. از مهم‌ترین مزایای این عملگرها می‌توان به تولید کرنش زیاد تا حدود ۵۰٪، رفتار برگشت‌پذیر، نسبت قدرت به وزن بالا که قابل مقایسه با موتور جت (۵/۲۶ کیلووات) است، توانایی بلندکردن نیروهایی

۱۰۰ برابر سنگین‌تر از ماهیچه‌های انسانی و چگالی انرژی ۲،۶۳ کیلوژول بر کیلوگرم اشاره کرد. این مزایا، همراه با سهولت و هزینه بسیار پایین تولید، منجر به استفاده گسترده از این نوع عملگرها در کاربردها و مکان‌هایی شده است که نیاز به تولید حرکت خطی دارند [۸].

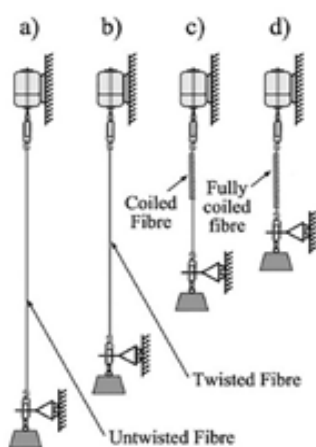
این مقاله مروری به بررسی روش ساخت، معادلات حاکم و روش‌های گوناگون تحریک حرارتی عملگرهای پلیمری تابیده و مارپیچ شده می‌پردازد.

۲ روش ساخت عملگرهای پلیمری تابیده و مارپیچ شده

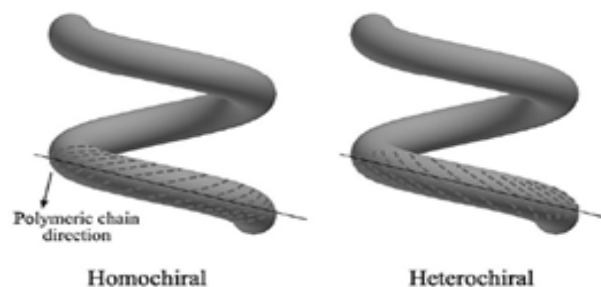
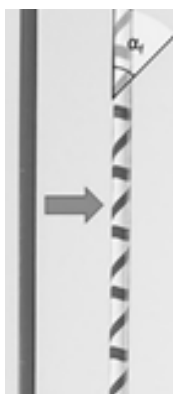
به طور کلی، دو روش برای ساخت این نوع از عملگرها در ادبیات علمی بیان شده و به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است:

در روش اول که به روش مارپیچ خودکار (Auto Coiling) معروف است، انتهای بالایی الیاف به موتور الکتریکی متصل شده و انتهای پایینی آن توسط وزنه‌ای تحت کشش قرار می‌گیرد. برای جلوگیری از چرخش انتهای پایینی و باز نشدن لیف، این انتها به گونه‌ای مهار می‌شود که قابلیت حرکت عمودی داشته باشد. با شروع چرخش موتور، الیاف ابتدا تابیده شده و پس از رسیدن به حد معینی از تابیدگی، حالت فنری پیدا کرده و مارپیچ‌ها شروع به تشکیل شدن می‌کنند (شکل ۱). انتخاب صحیح مقدار وزنه برای این فرایند بسیار مهم است، زیرا مقدار زیاد می‌تواند باعث پاره شدن الیاف شده و مقدار کم می‌تواند منجر به ایجاد گره در طول فرایند ساخت شود.

در روش دوم، الیاف تابیده شده به دور یک مندرل پیچیده می‌شود تا ساختار مارپیچ‌مانند تشکیل شود. مارپیچ‌های تولید شده در هر دو روش به دلیل تنش‌های پسماند، قابلیت باز شدن



شکل ۱ نحوه ساخت عملگر به روش مارپیچ خودکار [۹].



شکل ۲ عملگرهای هموکایرال و هتروکایرال [۱۰].

شکل ۳ تصویر قبل و بعد از تاباندن الیاف. خطوط بیانگر جهت زنجیره‌های مولکولی تشکیل‌دهنده الیاف قبل و بعد از تاباندن که به زاویه بایاس α_f منتقل می‌شود [۱۱].

$$\alpha_f = \tan^{-1} \pi DT \quad (1)$$

که در آن (D) قطر لیف و (T) پیچش اعمال شده به لیف (تعداد چرخش‌ها بر متر) است (شکل ۳) [۸].

هاینس و همکاران [۸] در قسمتی از پژوهش خود بیان داشتند که تشکیل مارپیچ به وسیله تاباندن آن در گشتاور بحرانی رخ می‌دهد:

$$\tau_c = \sqrt{2EIF} \quad (2)$$

که در آن E (Nm²) مدول یانگ، I (m⁴) ممان دوم سطح دایروی لیف با قطر (D) که به صورت $(\pi D^4/16)$ بیان شده و F (N) بار کششی اعمال شده به الیاف در هنگام تابیده شدن است. همچنین برای مارپیچ‌های تشکیل شده تحت بار کششی (F)، تنش مهندسی (σ) به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (3)$$

که در آن F (N) بار کششی اعمال شده به الیاف در هنگام تابیده شدن و A_0 (m²) مساحت اولیه سطح دایروی آن است که به صورت $(\pi D^2/4)$ محاسبه می‌شود.

همچنین از دیگر عوامل مهم می‌توان از میزان تاباندن بحرانی (T_c) نام برد که رابطه آن به صورت ذیل است:

$$T_c = \frac{\tau_c}{2\pi JG'} \quad (4)$$

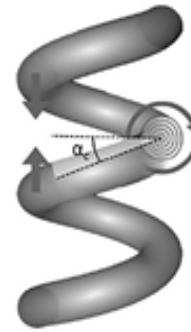
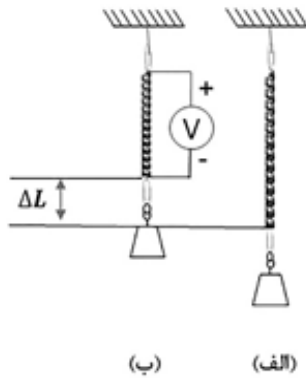
که در آن T_c (Turn/m) میزان تاباندن بحرانی، J (m⁴) ممان

دارند. بنابراین، برای حل این مشکل از عملیات بازپخت حرارتی استفاده می‌شود تا ساختار عملگر ثابت بماند [۸].

هنگامی که جهت تاباندن لیف با جهت مارپیچ‌ها یکسان باشد، به این عملگرها هموکایرال (Homochiral) گفته می‌شود و هنگامی که این دو جهت مخالف باشند، به آن‌ها هتروکایرال (Heterochiral) اطلاق می‌شود (شکل ۲). عملگرهای هموکایرال با قرار گرفتن در معرض گرما منقبض می‌شوند، در حالی که عملگرهای هتروکایرال در همان شرایط منبسط می‌شوند [۸].

۳ سازوکار و روابط حاکم بر عملگرهای تابیده و مارپیچ‌شده

همان‌طور که در قسمت قبل به اختصار بیان شد، برای ساخت این نوع از عملگرها، باید آن‌ها را در راستای الیاف تحت کشش قرار داد تا درشت‌مولکول‌های تشکیل‌دهنده الیاف هماهنگ و هم‌تراز شوند. این هماهنگی و هم‌ترازی باعث ایجاد ویژگی کلیدی و بسیار مهمی به نام ناهمسانگردی در آن می‌شود. به‌طور خلاصه، برای عملگرهایی که با حرارت تحریک می‌شوند، انبساط حرارتی در راستای طول الیاف با انبساط حرارتی شعاعی آن متفاوت است. به‌واسطه این اثر، هنگامی که الیاف پلیمری نظیر نخ ماهیگیری گرم می‌شوند، در راستای قطر خود منبسط شده و در راستای طول خود منقبض می‌شوند. این خاصیت از ساختار مولکولی الیاف ناشی می‌شود، جایی که نیروهای آنتروپی باعث انقباض در راستای طول و افزایش حجم در هنگام گرم شدن می‌شوند. با اعمال پیچش به الیاف ناهمسانگرد، عناصر تشکیل‌دهنده آن به حالت حلزونی تغییر شکل می‌دهند. این پیچش در سطح آن بسیار چشمگیر است، به نحوی که تراز و هماهنگی الیاف از محور لیف به زاویه α_f که همان زاویه بایاس است منتقل می‌شود، که مطابق رابطه زیر است:

شکل ۴ زاویه بایاس مارپیچ (α_e) [۱۱].

شکل ۵ طرح‌واره‌ی تحریک عملگر تابیده و مارپیچ‌شده توسط روش گرمایش ژول. الف) عملگر تابیده و مارپیچ‌شده ب) انقباض عملگر تابیده و مارپیچ‌شده در اثر اعمال ولتاژ و برقراری جریان الکتریکی به اندازه ΔL که از یلفی با طول اولیه (l) ساخته شده‌اند، روابط زیر برقرار است:

$$\sin \alpha_c = \frac{L}{l} \quad (8)$$

$$\cos \alpha_c = \frac{\pi N D}{l} \quad (9)$$

با توجه به روابط بالا و با صرف‌نظر کردن از تغییر طول ناچیز (l) برای عملگری که توسط وزنه‌ای تحت کشش قرار گرفته و توسط حرارت تحریک می‌شود، میزان تغییر در تاباندن یلف به صورت فوق قابل بیان است:

$$\Delta T = \frac{N \Delta L}{l^2} \quad (10)$$

با توجه به رابطه بالا قابل مشاهده است که انقباض و انبساط مارپیچ‌ها به دلیل باز شدن یلف در هنگام گرم و سرد شدن صورت می‌پذیرد [۱۱].

۴ تحریک حرارتی

برای بهره‌برداری از عملگرهای ساخته‌شده، آن‌ها به وسیله حرارت تحریک می‌شوند. به هنگام تحریک عملگرهای ساخته‌شده توسط حرارت، آن‌ها در راستای طول خود منقبض شده و می‌توانند جابه‌جایی خطی تولید کنند. همان‌گونه که در قسمت‌های قبل نیز بیان شد، روش‌های مختلفی برای تأمین حرارت تحریک این نوع از عملگرها در منابع ذکر شده است که

اینرسی قطبی که به صورت $(\pi D^4)/32$ برای یلف استوانه‌ای قابل بیان است و G' مدول برشی لیف است. با ترکیب روابط (۳) و (۴) می‌توان میزان تاباندن مورد نیاز برای به دست آوردن یلف مارپیچ‌شده را محاسبه کرد.

$$T_c = \frac{8\sqrt{2\sigma E}}{\pi D G'} \quad (5)$$

معادلات بالا بیان می‌دارد که میزان تاباندن بحرانی برای تشکیل مارپیچ‌ها به صورت معکوس با قطر یلف هنگامی که تاباندن در تنش‌های کششی ثابت انجام می‌شود، در ارتباط است. پس از تشکیل مارپیچ، هر مارپیچ با مارپیچ کنار خود زاویه‌ای درست می‌کند که به آن زاویه بایاس مارپیچ گویند و آن را با α_e نمایش می‌دهند (شکل ۴).

همچنین شاخص فنریت (C) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$C = \frac{\text{میانگین قطر مارپیچ‌ها}}{\text{قطر یلف}} = \frac{D}{d} \quad (6)$$

همان‌طور که در قسمت‌های قبل نیز بیان شد، عملگرهای فوق به هنگام تحریک توسط حرارت، در راستای شعاعی خود منبسط شده و در راستای طولی نیز منقبض می‌شوند. این فرایند باعث ایجاد تحریک پیچشی شده که باعث می‌شود عملگر تمایل به باز شدن داشته باشد. این عمل با توجه به رابطه مکانیک فنرها به شکل زیر بیان شده است:

$$\Delta T = \frac{\sin(\alpha'_c) \cos(\alpha'_c)}{\pi D'} - \frac{\sin(\alpha_c) \cos(\alpha_c)}{\pi D} \quad (7)$$

که در آن D (m) و D' (m) به ترتیب میانگین قطر مارپیچ قبل و بعد از گرم شدن و α_e زاویه بایاس مارپیچ است. همچنین برای عملگرهایی که از (N) دور مارپیچ و با طول

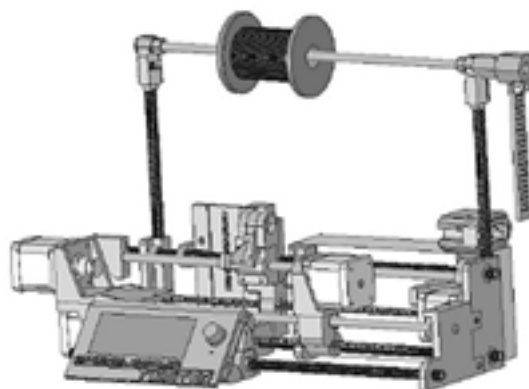
تئوری، مدلی ریاضی را برای ولتاژ-جریان و جریان-نیرو ارائه دادند و دمای عملگر را با روش گرمایش ژول، از طریق اندازه‌گیری جریان الکتریکی و معادلات انتقال حرارت تخمین زدند. نتایج نشان داد که بین جریان و نیرو رابطه‌ای چندجمله‌ای وجود دارد که مشابه عملکرد عملگرهای الکتریکی سنتی است. همچنین مشاهده شد که ولتاژ اعمالی بر دو سر عملگر باعث افزایش دما به دلیل مقاومت الکتریکی می‌شود و این منجر به رابطه‌ی دینامیکی بین جریان و ولتاژ می‌شود که به صورت معادله دیفرانسیل بیان شد [۱۴].

وو و ژنگ مدلی را بر اساس نظریه‌ی کشسانی میله‌ها برای تعیین ارتباط بین تحریک کششی و نیروی اعمال شده در ساخت عملگر توسعه دادند. سپس یک نمونه عملگر نایلونی تابیده و مارپیچ شده با پوشش نقره را تحت نیروهای مختلف به صورت تجربی بررسی کردند و تنش، کرنش بازیابی شده و حداکثر جابه‌جایی طولی را اندازه‌گیری کردند. پژوهش آن‌ها نشان داد که نیروی ساخت ۱۰/۴۴ مگاپاسکال می‌تواند ۵۲/۶ درصد جابه‌جایی طولی با کار مخصوص ۱۸۶/۴۹ ژول بر کیلوگرم ایجاد کند [۱۵].

مینار و همکاران ابتدا رابطه میان طول نهایی عملگر تابیده و مارپیچ ساخته شده و طول اولیه الیاف مورد استفاده را بررسی کردند. سپس با استفاده از آزمایش‌های تجربی و روش گرمایش ژول، خواص مکانیکی عملگر مانند ضریب سختی فنر و ضریب میرایی را تحلیل کردند. نتایج نشان داد که طول نهایی نمونه تقریباً ۶/۸ برابر کوتاه‌تر از طول اولیه الیاف بود. همچنین، حداکثر جابه‌جایی ۱۱ میلی‌متر در دمای ۵۴ درجه سانتی‌گراد، ضریب سختی فنر ۱۶۴ نیوتن بر متر و ضریب میرایی ۰/۴ نیوتن‌تانه بر متر اندازه‌گیری شد [۱۶].

سان و همکاران روش جدیدی برای ساخت عملگرهای تابیده و مارپیچ شده معرفی کردند که با فاصله اولیه بین مارپیچ‌ها بدون نیروی اولیه بیش از ۴۸ درصد انقباض را ایجاد می‌کند. با استفاده از گرمایش ژول، پاسخ استاتیک و دینامیک عملگرها در برابر تغییرات دما و زمان بررسی شد و نشان داد که کاهش دمای بازپخت و افزایش زاویه گام مارپیچ‌ها منجر به پاسخ سریع‌تر و جابه‌جایی بیشتر می‌شود [۱۷].

کرمی و همکاران در ابتدا رابطه‌ای غیرخطی برای مدول کشسانی به عنوان تابعی از دما و نیروی اعمال شده را تعریف کردند. آن‌ها دریافتند که مدول به‌طور چشمگیری به دما، به‌ویژه دماهای بالاتر از دمای انتقال شیشه، وابسته است. سپس مدلی برای اندازه‌گیری میزان تابیدن و باز شدن عملگر هنگام اعمال حرارت ارائه کردند و در نهایت، مدل‌های ارائه شده را با نتایج آزمایش‌های



شکل ۶ دستگاه ساخته شده برای تاباندن عملگر ساخته شده از نخ ماهیگیری و سیم مسی به صورت هم‌زمان [۱۲].

در ادامه به بیان آن‌ها پرداخته و پژوهش‌های انجام شده در هر زمینه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

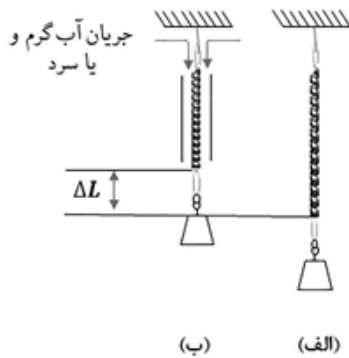
۴-۱- تحریک حرارتی توسط گرمایش ژول

در این روش ابتدا باید الیاف پلیمری سازنده عملگر توسط موادی پوشانده شوند تا خاصیت رسانایی پیدا کرده و سپس با اعمال ولتاژ و جریان الکتریکی به دو سر آن گرمای مورد نیاز برای تحریک عملگر ساخته شده، فراهم شود (شکل ۵). برای رسیدن به این مقصود، محققان از روش‌های مختلفی نظیر استفاده از پوشش نقره و افزودن رنگی از جنس نقره به الیاف سازنده عملگر استفاده کردند. همچنین از دیگر روش‌های مطرح شده در منابع می‌توان به استفاده از سیمی از جنس نیکل کروم یا مس اشاره کرد که در طی فرایند ساخت به همراه الیاف سازنده عملگر، تابانده شده و سپس مارپیچ می‌شود.

سموچکین دستگاهی را معرفی کرد (شکل ۶) که عملگرهایی ساخته شده از نخ ماهیگیری و سیم مسی را تابانده و با استفاده از آزمایش‌های تجربی، خواص عملگرهای ساخته شده از نخ ماهیگیری را با دو قطر مختلف بررسی کرد [۱۲].

کرمی و تادیسسی مدلی برای پیش‌بینی رفتار عملگری از جنس نخ ماهیگیری تابیده و مارپیچ شده که با گرمایش ژول تحریک می‌شود، را ارائه کردند. ابتدا، برای پیش‌بینی افزایش دما، معادلات انتقال حرارت با تغییرات مقاومت الکتریکی توسعه یافت. سپس، تأثیرات تغییرات دما بر جابه‌جایی عملگر و تأثیرات آن بر طول عملگر به دلیل انبساط حرارتی و تغییرات مدول کشسانی مدل‌سازی شد. نتایج آن‌ها مطابقت دقیقی با نتایج آزمایشی داشت [۱۳].

رضائیان و همکاران با استفاده از داده‌های تجربی و مفاهیم



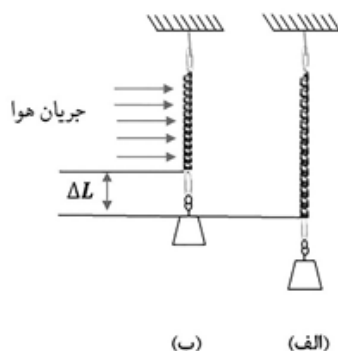
شکل ۷ طرح‌واره تحریک عملگر تابیده و مارپیچ‌شده توسط آب گرم. الف) عملگر تابیده و مارپیچ‌شده پرورش‌یافته. ب) انقباض عملگر تابیده و مارپیچ‌شده پرورش‌یافته در اثر اعمال آب گرم به اندازه ΔL .

استفاده از این نتایج، تغییر طول نمونه را در پاسخ به نیروهای اعمال‌شده محاسبه کردند. افزایش طول گرماکشسان با استفاده از آب گرم بررسی شد و سازه وون میز تحت تحلیل الاستواستاتیک قرار گرفت. نتایج تحلیل نشان داد که تغییر شکل سازه به شدت به زاویه بین عملگرها بستگی دارد [۲۳].

۴-۳ تحریک توسط هوای گرم

در این روش، عملگر با استفاده از جریان هوای گرم تولید شده توسط دمنده هوای گرم مانند سشوار صنعتی تحریک می‌شود و برای بررسی رفتار بازگشت‌پذیر، سرد شدن آن در دمای محیط انجام می‌گیرد (شکل ۸).

چروبینی و همکاران از جریان هوای گرم (شکل ۹) برای بررسی عملگرهای تابیده و مارپیچ‌شده نایلونی استفاده کردند. آن‌ها از یک نخ ماهیگیری ۰/۵ میلی‌متری که تحت کشش ۰/۵



شکل ۸ طرح‌واره تحریک عملگر تابیده و مارپیچ‌شده توسط جریان هوای گرم. الف) عملگر تابیده و مارپیچ‌شده پرورش‌یافته. ب) انقباض عملگر تابیده و مارپیچ‌شده پرورش‌یافته در اثر جریان هوای گرم به اندازه ΔL .

تجربی توسط روش گرمایش ژول بررسی کردند [۱۸]. وو و همکاران به معرفی ربات نرم خزننده با پاهایی شبیه خار پرداختند که حرکتی همانند کرم حلزونی داشت. در این ربات از دو عملگر تابیده و مارپیچ‌شده استفاده شد که با استفاده از روش گرمایش ژول، سرعت حرکت ۰/۲۷۵ میلی‌متر بر ثانیه در ولتاژ ۲۴ ولت به دست آمد [۱۹].

مائارو و همکاران با استفاده از روش گرمایش ژول، ربات زیست تقلیدپذیری را توسعه دادند که با الهام از عروس دریایی شنا می‌کرد. این ربات با استفاده از عملگرهای پلیمری مارپیچ‌شده، سرعت شنا عمودی ۷/۳ میلی‌متر بر ثانیه داشته و توانست به‌طور موفقیت‌آمیز در شنا عمل کند، همچنین مشابهت‌های زیادی با عروس دریایی داشته و معیارهای شنا آن با ربات‌های مشابه قابل مقایسه بود [۲۰].

گائو و همکاران با استفاده از روش گرمایش ژول به مطالعه مدلی چندلایه برای پیش‌بینی دقیق خواص مکانیکی و حرارتی و پاسخ‌های ترمومکانیکی عملگرهای تابیده و مارپیچ‌شده ارائه دادند. نتایج نشان داد که خواص مکانیکی و حرارتی این عملگرها تحت تأثیر شعاع و زاویه پیچش الیاف پلیمری قرار دارند. مدل پیشنهادی آن‌ها می‌تواند برای بهینه‌سازی پاسخ‌های عملگرهای تابیده و مارپیچ‌شده با تنظیم عوامل هندسی و زاویه پیچش استفاده شود [۲۱].

گونزالز و همکاران با استفاده از گرمایش ژول به بررسی سامانه توانبخشی مچ پا برای کودکان با استفاده از عملگرهای تابیده و مارپیچ‌شده پرداختند که شامل شناسایی عملگر، طراحی مکانیکی، راهبرد کنترل و رابط کاربری انسان-رایانه بود. دستگاه توسعه‌یافته آن‌ها قادر به ایجاد گشتاور ۱،۴ نیوتن‌متر و حرکت ۱۰ درجه در دورسی فلکشن طی ۵ ثانیه بود که از رابط کاربری الکترومایوگرافی بهره می‌برد. پژوهش آن‌ها گامی مهم در جهت ارائه راه‌حلی برای توانبخشی کودکان با ناتوانی‌های جسمی محسوب شد [۲۲].

۴-۲ تحریک توسط آب گرم

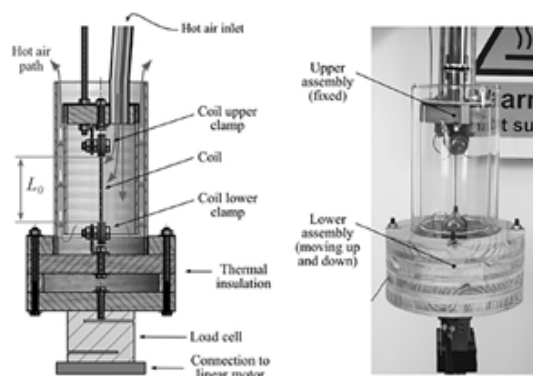
در این روش، عملگرها با چندین چرخه آب گرم تحریک می‌شوند و برای بررسی رفتار بازگشت‌پذیر، با آب سرد یا دمای محیط سرد می‌شوند (شکل ۷).

هاینس و همکاران عملگری را با استفاده از آب گرم ۹۵ درجه و آب سرد ۲۵ درجه سانتی‌گراد تحریک کردند که در نتیجه، عملگر حدود ۱۲ درصد منقبض شد [۸].

مارین و همکاران از آزمایش‌های تجربی برای ارزیابی مدول کشسانی و ثابت فنر عملگر ساخته‌شده استفاده کردند. سپس با

۵ نتیجه‌گیری

عملگرهای تابیده و مارپیچ‌شده پلیمری به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردشان مانند سبک‌وزنی، انعطاف‌پذیری بالا و توانایی تولید نیروهای بزرگ، به‌عنوان گزینه‌های جذاب در کاربردهای مختلف از جمله رباتیک نرم، تجهیزات پزشکی و سامانه‌های حرارتی نقش مهمی در بهبود عملکرد و کارایی این عملگرها ایفا می‌کنند. تحریک توسط گرمایش ژول به‌عنوان یکی از متداول‌ترین روش‌های تحریک حرارتی برای این عملگرها، امکان کنترل دقیق دما و تنظیم سریع پاسخ‌های حرارتی را فراهم می‌کند. با این حال، نیاز به منبع تغذیه پایدار و مدیریت مؤثر حرارت تولیدی از چالش‌های این روش محسوب می‌شود. تحریک توسط آب گرم، به دلیل انتقال حرارت مؤثر و یکنواخت، یکی دیگر از روش‌های موجود برای تحریک عملگرهای تابیده و مارپیچ‌شده است. این روش برای کاربردهایی که نیاز به حرارت‌دهی با دقت و یکنواختی بالا دارند، مناسب است. با این حال، نیاز به مدیریت مؤثر جریان آب و تجهیزات مرتبط از جمله چالش‌های این روش است. استفاده از تحریک توسط جریان هوای گرم به‌عنوان روشی دیگر، امکان گرمایش سریع و قابل کنترل را فراهم می‌کند. این روش برای کاربردهایی که نیاز به تنظیم سریع دما و تغییرات سریع در حالت عملگر دارند، مناسب است. با این حال، نیاز به تجهیزات مناسب برای تولید و کنترل جریان هوا و همچنین تأثیرات محیطی مانند جریان هوای اطراف، از معایب این روش به حساب می‌آید.



شکل ۹ طرح‌واره سازی استفاده‌شده برای تحریک عملگرهای تابیده و مارپیچ‌شده به وسیله جریان هوای گرم [۹]

کیلوگرم قرار گرفته بود استفاده کردند. شاخص فنری و زاویه بایاس مارپیچ پس از این مرحله به ترتیب $1/4$ و $1/8$ درجه بود. نتایج نشان داد که اتلاف پسماند به دما وابسته است و با افزایش دما کاهش می‌یابد. این تحقیق نشان داد که عملگر ساخته شده می‌تواند به‌عنوان فنری منفعل با عملکرد مطلوب استفاده شود [۹]. مورتی و همکاران مبدل ترمومکانیکی جدیدی با استفاده از الیاف نایلونی و محفظه شیشه‌ای برای اعمال هوای گرم را معرفی و سپس به صورت تجربی خواص ترمومکانیکی این عملگر را در دمای 30 تا 120 درجه سانتی‌گراد بررسی کردند [۱۰]. برای درک هر چه بیشتر موضوع، خلاصه‌ای از عوامل مورد استفاده در ساخت عملگرهای عنوان شده در پژوهش‌های گذشته به همراه روش تحریک آن‌ها به ترتیب سال در جدول ۱ بیان شده است.

جدول ۱ خلاصه‌ای از عوامل مورد استفاده در ساخت و تحریک ماهیچه‌های مصنوعی اشاره شده در پژوهش‌های گذشته.

ردیف	نویسندگان	سال	نوع پلیمر	قطر الیاف (mm)	نیرو / مقدار جرم	مدت زمان بازپخت	دما یا جریان الکتریکی مورد استفاده جهت بازپخت	روش تحریک
۱	هاینس و همکاران [۸]	۲۰۱۴	نخ ماهیگیری	۰/۸۶	۵۰۰ گرم	متغیر	متغیر	آب گرم
۲	چروبینی و همکاران [۹]	۲۰۱۵	نخ ماهیگیری	۰/۵	۵۰۰ گرم	۱ ساعت	۱۵۰ °C	هوای گرم
۳	مورتی و همکاران [۱۰]	۲۰۱۵	نخ ماهیگیری	۰/۵	۵۰۰ گرم	۱ ساعت	۱۵۰ °C	هوای گرم
۴	سموچکین [۱۲]	۲۰۱۶	نخ ماهیگیری با سیم مسی	۰/۵ و ۰/۸	۲۰۰ و ۳۰۰ گرم	-	-	گرمایش ژول
۵	مارین و همکاران [۲۳]	۲۰۱۷	نخ ماهیگیری	۰/۸	۲۸۰ و ۳۲۰ گرم	-	-	آب گرم
۶	کرمی و تادسی [۱۳]	۲۰۱۷	نخ نایلونی با پوشش نقره	۰/۲	۱۵۰ گرم	۲ سیکل	۱۵۰ °C	گرمایش ژول
۷	رضائیان و همکاران [۱۴]	۲۰۱۹	نخ نساجی رسانا	-	۲۰۰ گرم	۳۰ دقیقه	۱۷۰ °C	گرمایش ژول
۸	وو و ژنگ [۱۵]	۲۰۲۰	نایلون ۶ با پوشش نقره	۰/۶	-	۹۰ دقیقه	۱۴۰ °C	گرمایش ژول
۹	مینار و همکاران [۱۶]	۲۰۲۰	نخ ماهیگیری با سیم مقاومت دار	۰/۷	۵۰۰ گرم	-	-	گرمایش ژول
۱۰	سان و همکاران [۱۷]	۲۰۲۰	نخ نساجی رسانا	-	۲۰-۴۰ گرم	-	۱۸۰ °C و ۲۰۰ °C	گرمایش ژول
۱۱	کرمی و همکاران [۱۸]	۲۰۲۱	نایلون ۶ با پوشش نقره	۰/۳	۱۵۰ گرم	-	-	گرمایش ژول
۱۲	وو و همکاران [۱۹]	۲۰۲۲	نایلون ۶ رسانا	۰/۶	۳۰۰ گرم	۹۰ دقیقه	۱۴۰ °C	گرمایش ژول
۱۳	مائارو و همکاران [۲۰]	۲۰۲۳	نخ ماهیگیری با سیم نیکروم	۰/۸	۵۰۰ گرم	۹۰ دقیقه	۱۸۰ °C	گرمایش ژول
۱۴	گائو و همکاران [۲۱]	۲۰۲۴	الیاف پلیمری با سیم رسانا	۰/۳۲۵	-	-	-	گرمایش ژول
۱۵	گونزالز و همکاران [۲۲]	۲۰۲۴	نخ ماهیگیری با سیم نیکروم	۰/۸۴	۱۰۰۰ گرم	۵ سیکل ۵ دقیقه‌ای	دمای حاصل از جریان ۲۴۰ mA	گرمایش ژول

مراجع

1. Tondu, B., What is an Artificial Muscle? A Systemic Approach, *Actuators*, 4, 4, 336-352, **2015**.
2. Leng, X., Hu, X., Zhao, W., An, B., Zhou, X. and Liu, Z., "Recent Advances in Twisted-Fiber Artificial Muscles, *Advanced Intelligent Systems*, 3, 5, 2000185, **2021**.
3. Zhang, J., Sheng, J., O'Neill, C.T., Walsh, C.J., Wood, R.J., Ryu, J.-H., Desai, J.P. and Yip, M.C., Robotic Artificial Muscles: Current Progress and Future Perspectives, *IEEE Transactions on Robotics*, 35, 761-781, **2019**.
4. Yun, S.S., Kang, B.B. and Cho, K.-J., "Exo-Glove Pm: An Easily Customizable Modularized Pneumatic Assistive Glove, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2, 1725-1732, **2017**.
5. Olander, A., An Electrochemical Investigation of Solid Cadmium-Gold Alloys, *Journal of the American Chemical Society*, 54, 3819-3833, **1932**.
6. Buehler, W.J., Gilfrich, J.V. and Wiley, R.C., Effect of Low-Temperature Phase Changes on the Mechanical Properties of Alloys near Composition Tini, *Journal of Applied Physics*, 34, 1475-1477, **1963**.
7. Ho, M., Kim, Y., Cheng, S.S., Gullapalli, R.P. and Desai, J.P., Design, Development, and Evaluation of an Mri-Guided Sma Spring-Actuated Neurosurgical Robot, *The International Journal of Robotics Research*, 34, 1147 - 1163, **2015**.
8. Haines, C.S., Lima, M.D., Li, N., Spinks, G.M., Foroughi, J., Madden, J.D.W., Kim, S.-H., Fang, S., Jung de Andrade, M., Göktepe, F., Göktepe, Ö., Mirvakili, S.M., Naficy, S., Lepró, X., Oh, J., Kozlov, M.E., Kim, S.J., Xu, X., Swedlove, B.J., Wallace, G.G. and Baughman, R.H., Artificial Muscles from Fishing Line and Sewing Thread, *Science*, 343, 868-872, **2014**.
9. Cherubini, A., Moretti, G., Vertechy, R. and Fontana, M., Experimental Characterization of Thermally-Activated Artificial Muscles Based on Coiled Nylon Fishing Lines, *AIP Advances*, 5, 067158, **2015**.
10. Moretti, G., Cherubini, A., Vertechy, R. and Fontana, M., Experimental Characterization of a New Class of Polymeric-Wire Coiled Transducers, *Smart Structures*, **2015**.
11. Haines, C.S., Li, N., Spinks, G.M., Aliev, A.E., Di, J. and Baughman, R.H., New Twist on Artificial Muscles, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113, 11709 - 11716, **2016**.
12. Semochkin, A., A Device for Producing Artificial Muscles from Nylon Fishing Line with a Heater Wire, *IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing (ISAM)*, 26-30, **2016**.
13. Karami, F. and Tadesse, Y., "Modeling of Twisted and Coiled Polymer (TcP) Muscle Based on Phenomenological Approach, *Smart Materials and Structures*, 26, 125010, **2017**.
14. Rezaeian, S., Alghooneh, A.R., Yousefi-Koma, A. and HosseiniNejad, R., Mathematical Model Extraction and State Space Construction for Nylon Based Smart Force Sensor *7th International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM)*, 636-641, **2019**.
15. Wu, C. and Zheng, W., A Modeling of Twisted and Coiled Polymer Artificial Muscles Based on Elastic Rod Theory, *Actuators*, 9, 25, **2020**.
16. Minár, M., Goga, V., Čápková, R., Ondřejčka, K. and Murín, J., Basic Parameters of Coiled Fishing Line Actuator, *Cybernetics & Informatics (K&I)*, 1-4, **2020**.
17. Sun, J., Tighe, B., Liu, Y. and Zhao, J., Twisted-and-Coiled Actuators with Free Strokes Enable Soft Robots with Programmable Motions, *Soft Robotics*, **2020**.
18. Karami, F., Wu, L. and Tadesse, Y., Modeling of One-Ply and Two-Ply Twisted and Coiled Polymer Artificial Muscles, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 26, 300-310, **2021**.
19. Wu, C., Zhang, Z. and Zheng, W., A Twisted and Coiled Polymer Artificial Muscles Driven Soft Crawling Robot Based on Enhanced Antagonistic Configuration, *Machines*, 10, 2, **2022**.
20. Matharu, P.S., Gong, P., Guntaka, K.P.R., Almubarak, Y., Jin, Y. and Tadesse, Y.T., Jelly-Z: Swimming Performance and Analysis of Twisted and Coiled Polymer (TcP) Actuated Jellyfish Soft Robot, *Sci Rep*, 13, 1, 11086, **2023**.
21. Gao, Z., Guo, J., Zhang, Y., Zhou, Z., Zhang, C., Li, H., Chen, B. and Wang, J., Multilayer Modeling Framework for Analyzing Thermo-Mechanical Properties and Responses of Twisted and Coiled Polymer Actuators, *Smart Materials and Structures*, 33, 4, **2024**.
22. Gonzalez-Vazquez, A., Garcia, L. and Kilby, J., Paediatric Ankle Rehabilitation System Based on Twisted and Coiled Polymer Actuators, *Smart Materials and Structures*, 33, 7, **2024**.
23. Murín, J., Goga, V., Hrabovský, J., Búc, D. and Podešva, P., Measurement and Numerical Analysis of the Artificial Muscles Made of Fishing Line, *Advanced Materials Letters*, 8, 5, 635-640, **2017**.