

## حسگرهای پوشیدنی مبتنی بر کریگامی: مروری بر طراحی و عملکرد

هانیه گلشادی<sup>۱</sup>، محسن شنبه<sup>۱\*</sup><sup>۱</sup>اصفهان-دانشگاه صنعتی اصفهان-دانشکده مهندسی نساجی

mshanbeh@iut.ac.ir

تاریخ دریافت ۱۴۰۳/۱۲/۱۷ تاریخ پذیرش ۱۴۰۴/۰۶/۲۹

## چکیده

کریگامی/ اوریگامی به عنوان هنر باستانی برش کاغذ و روش‌های تا کردن کاغذ شناخته می‌شود که همچنین به طراحی و مهندسی مواد، منسوجات و ساختارهای چندمنظوره تبدیل شده است. هندسه‌ی طراحی شده‌ی این ساختارها از طریق ایجاد برش‌های ظریف و تا کردن صفحات اولیه ایجاد می‌شود. این هندسه‌ی منحصربه‌فرد، قابلیت ایجاد منسوجاتی با رفتارهای مکانیکی خاص مانند تغییر شکل دقیق، رفتار برون‌گستر، کشسانی بسیار بالا و پایداری چندین جهت را داشته و دامنه‌ی وسیعی از کاربردها را در مقیاس مختلف فراهم آورده است. این روش ساده یک زیرساخت انعطاف‌پذیر برای ادغام اجزای الکترونیکی مختلف و اجزای پاسخگر (حسگرها) ارائه می‌دهد و راه را برای توسعه‌ی پوشاک هوشمند در کاربردهای آینده هموار می‌کند. توسعه‌ی فرایندهای مختلف ساخت کریگامی الهام بخش تحقیقات در زمینه انتخاب مواد مناسب مانند پلیمرهای انعطاف‌پذیر، صفحات رسانا و نانومواد بوده است که کاربرد این فناوری را در منسوجات هوشمند، حوزه‌ی سلامت، ورزش و غیره هموار کرده است. این مقاله، به بررسی پیشینه‌ی ساختارهای کریگامی می‌پردازد، سپس انواع حسگرهای کریگامی، مواد قابل استفاده در آن‌ها، اصول طراحی و ویژگی‌های آن‌ها را بررسی کرده و در نهایت دامنه‌ی وسیعی از کاربردهای مهندسی مانند حسگرهای پوشیدنی (برای اندازه‌گیری و نظارت بر ضربان قلب، تنفس، حرکت مفاصل و غیره)، ساختارهای منعطف الکترونیک و ابزارهای محافظت از سلامت عمومی انسان را در کاربردهای پوشیدنی مرور خواهد کرد.

کلمات کلیدی: حسگرهای کریگامی، منسوجات هوشمند، حسگرهای کشش، حسگرهای فشار، دقت.

**Kirigami-based wearable sensors: A review of design and performance**Hanieh Golshadi<sup>1</sup>, Mohsen Shanbeh<sup>1\*</sup><sup>1</sup>Department of Textile Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan 8415683111, Iran

mshanbeh@iut.ac.ir

## Abstract

Kirigami/ origami serves as the ancient art of paper-cutting and paper-folding techniques that are also functionalized into the design and engineering of multi-functional materials and textiles. The techniques based on slit cutting with carefully designed geometries involve the folding and cutting of initial substrates. This distinctive geometry enables specific mechanical behaviors such as accurate shape morphing, auxetics behavior, super-stretchability, and multi-stability, providing a wide range of applications at different length scales. This facile technique offers a flexible foundation for integrating various electronics and responsive components, paving the way for future sensor development in smart textiles. The advancement of various Kirigami fabrication processes has spurred extensive research into the diverse array of materials applications. These materials include flexible substrate, conductive sheets, and nanomaterials, which have shown immense potential the fields such as medical, healthcare, sport, and many others. This paper will discuss the background of kirigami structures and then introduce different types of kirigami sensors and the materials, techniques, and characterization used. Ultimately, this work aims to review a wide field of engineering applications, like wearable and wireless sensors (for monitoring heart rate, respiration, joint movements, etc.), flexible electronics, and healthcare devices for wearable applications.

Keywords: Kirigami, Smart textile, Strain Sensors, Pressure Sensors, Sensitivity.

## ۱. مقدمه

استفاده کرد. همچنین حسگرهای مبتنی بر کریگامی می‌توانند در منسوجات هوشمند برای نظارت بر سلامت مانند ضربان قلب، دمای بدن، فشار، ردیابی حرکات، یا ایجاد رابط‌های لمسی تعبیه شوند [۴-۶]. علاوه بر کاربردهای مذکور، سایر کاربردهای مهندسی آن در طراحی منسوجات با قابلیت‌هایی مانند مدیریت حرارتی (خنک‌کنندگی یا گرم‌کنندگی)، مقاومت در برابر سایش، آینه‌های پانل خورشیدی، اجزای پاسخ‌گر الکترونیک در حسگرها و رباتیک نرم، ساختارهای مهندسی با مقیاس میکرو/نانو در دستگاه‌های فتوولتائیک، ابرخازن‌ها، داربست‌های سه بعدی در مهندسی بافت و مواردی از این قبیل استفاده شود [۲، ۷ - ۱۰].

با تعابیر گفته شده، ساختارهای کریگامی می‌تواند با کاغذ، پارچه، ورقه‌های فلزی، مواد کامپوزیتی و هیدروژل با ساختارهای نوآورانه و به آسانی با استفاده از فرایند چاپ، برش‌های کامپیوتری، فرایند لیتو گرافی و غیره الگوبرداری و ساخته شوند [۹-۱۵]. بنابراین، این مقاله‌ی مروری با هدف ارائه‌ی بینشی از نحوه عملکرد حسگرهای مبتنی بر اصول ساختارهای کریگامی و روش‌های طراحی آن‌ها، بررسی جامعی از انواع حسگرها، مواد مورد استفاده در آن، اصول فیزیکی اولیه و کاربردهای آن را ارائه خواهد کرد. در این پژوهش، اطلاعات از طریق جستجو در گوگل اسکالر و سمنتیک اسکالر<sup>۶</sup> با استفاده از کلیدواژه‌هایی مانند "

اوریگامی<sup>۱</sup> و کریگامی<sup>۲</sup> از شیوه‌های حجم سازی با کاغذ است که در ژاپن قدیم با تکیه بر روش‌های مختلف از تا کردن (به معنای اوری)<sup>۳</sup>، کاغذ (به معنای گامی)<sup>۴</sup> و برش<sup>۵</sup> آن، ارائه شده است. استفاده از این روش‌ها، امکان تبدیل سازه‌های سه بعدی به ساختارهای مسطح در حجم کم و همچنین تبدیل ساختارهای مسطح دو بعدی به ساختار حجیم سه بعدی را فراهم می‌کند [۱]. کریگامی، هنر باستانی برش کاغذ است که با ایجاد برش‌های طراحی شده بسته به هندسه‌ی ساختار، در طراحی و ساخت رفتارهای مکانیکی مطلوب مانند شکل‌گیری مناسب، کشش پذیری بالا، کمانش و پایداری ساختار در تمامی جهات برای ساختارهای چندمنظوره، استفاده می‌شود. این در حالی است که اوریگامی ساختارهای بدون برش سه بعدی هستند [۲]. از آنجایی که تغییر شکل هندسی، خاصیت ارتجاعی ساختار کریگامی را عوض می‌کند، لذا ویژگی‌های آن تحت تاثیر الگو و جهت برش است [۳]. این ویژگی‌ها برای منسوجات هوشمند پوشیدنی که نیاز به راحتی، تطبیق با بدن، و تحمل تنش‌های مکانیکی دارند، بسیار مناسب است. به عنوان مثال، در لباس‌های ورزشی یا پزشکی برای بهبود تهویه یا ایجاد خاصیت ارتجاعی موضعی می‌توان از این ساختارها

<sup>1</sup> Origami

<sup>2</sup> Kirigami

<sup>3</sup> "Ori"

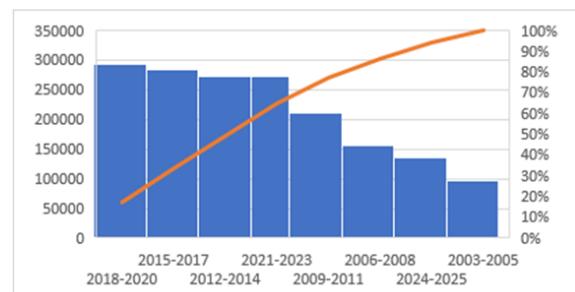
<sup>4</sup> "Kami" or "Gami"

<sup>5</sup> "Kiri"

<sup>6</sup> Semantic scholar

اصل متعلق به ژاپن بوده اما دهها هزار طرح دیگر از ایالات متحده آمریکا، انگلیس، فرانسه، آلمان و غیره نشات گرفته‌اند. طرح‌های مذکور از اشکال ساده تا بسیار پیچیده متغیر است؛ اشکال ساده متشکل از دو یا سه تاخوردگی بوده و اشکال بسیار پیچیده به ساعت‌ها تاخوردن نیاز دارند. با این حال این هزاران طرح یک چیز مشترک دارند و همه‌ی آن‌ها در ۵۰ سال گذشته اختراع شده‌اند. این هنر کاغذی یک هنر جوان و درعین حال پیر می‌باشد زیرا ۶۰ سال گذشته در ژاپن و ۴۰ سال اخیر در سراسر جهان، شاهد رشد و تکامل این هنر بوده‌ایم. طرح‌های ساده‌ی اولیه با آزمون و خطا گسترش یافته و تا اواخر قرن بیستم امکان ایجاد پیچیدگی و واقع‌گرایی<sup>۱</sup> مانند طراحی بال حشرات، امکان پذیر نبوده است. تعداد اشکال طراحی شده محدود بوده و در واقع تعداد معدودی از طراحان هستند که فراتر از اصول اولیه رفته‌اند و به طراحی مدل‌های پیچیده پرداخته‌اند [۱۶ و ۱۷]. تا کردن و برش کاغذ برای ایجاد اشیاء تشریفاتی یا تزئینی به قرن‌ها قبل در آسیا و اروپا باز می‌گردد. نمونه‌ای از اشکال اورینگامی و کریگامی در شکل ۲، ارائه شده است. برش‌های کریگامی علاوه بر افزایش انعطاف‌پذیری، به کاهش تنش‌هایی که منجر به از هم گسیختن و شکست ساختار می‌شود، کمک می‌کند. باتری‌های تغییر شکل‌پذیر، نمایشگرهای انعطاف‌پذیر، طراحی مدارها با قابلیت کشسانی بالا، انواع حسگرها و

حسگرهای کریگامی"، "حسگرهای کشش"، "حسگرهای فشار" و "منسوجات هوشمند" در شکل ۱ ارائه شده است. این نمودار تعداد مقالات منتشر شده طی سال‌های ۲۰۰۳-۲۰۲۵ را نشان می‌دهد که تعداد مقالات در بازه‌های سه ساله از اوج خود در سال‌های ۲۰۱۵-۲۰۱۷ و ۲۰۱۸-۲۰۲۰ (حدود ۳۰۰۰۰ مقاله) به طور مداوم کاهش یافته و در سال‌های ۲۰۲۴-۲۰۲۵ به حدود ۵۰۰۰۰ مقاله رسیده است. با این حال، خط رشد نسبی (نمایش داده شده با خط رشد نارنجی) از ۱۰٪ در سال‌های ۲۰۰۳-۲۰۰۵ به بیش از ۹۰٪ در سال‌های اخیر افزایش یافته است که ممکن است حاکی از افزایش اهمیت یا تمرکز بر حوزه‌ی مورد مطالعه باشد. این روند نزولی در تعداد مقالات می‌تواند نتیجه‌ی تغییر در رویکردهای پژوهشی در زمینه‌ی کریگامی باشد.



شکل ۱ - تعداد مقالات منتشر شده در سال‌های ۲۰۰۳-

۲۰۲۵

## ۲. تاریخچه حسگرهای کریگامی

کاغذ در سال ۱۰۲ پس از میلاد مسیح در چین اختراع شد و در قرن ششم به ژاپن رسید. هنر اورینگامی و کریگامی در

<sup>1</sup> realism

کاربردهای پوشیدنی مورد استفاده قرار گرفتند و این فناوری با پیشرفت‌هایی در مواد و تکنیک‌های ساخت به سرعت در منسوجات هوشمند و دستگاه‌های پوشیدنی گسترش یافت و تاکنون ادامه دارد [۲۱-۲۶].

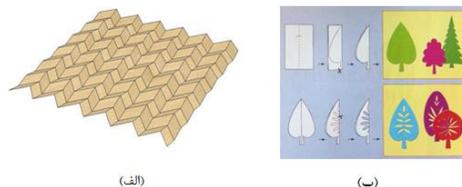
### ۳. انواع حسگرهای کریگامی و مواد به کار

#### رفته در آنها

منسوجات هوشمند پوشیدنی که با ادغام فناوری‌های الکترونیکی و حسگرها در پارچه‌ها ایجاد می‌شوند، به دلیل توانایشان در عملکردهای پیشرفته رشد زیادی داشته‌اند و با انواع حسگرها به صورت مستقیم در الیاف، نخ یا لایه‌های لباس تهیه می‌شوند یا از طریق فناوری‌هایی مانند چاپ، جوهرهای رسانا و نانو مواد روی پارچه ایجاد می‌شوند [۲۷-۳۳]. حسگرهای کریگامی به دلیل طراحی منحصر به فرد و قابلیت‌های خاص خود، در زمینه‌های مختلفی کاربرد دارند. برخی حسگرهای متداول کریگامی شامل: حسگرهای فشار، حسگرهای کششی، حسگرهای حرارتی، حسگرهای رطوبت، حسگرهای شیمیایی، حسگرهای حرکتی و نوری می‌باشد.

۱-۳ حسگر فشاری: حسگرهای فشار با استفاده از ساختار تا شونده، تغییرات فشار را اندازه‌گیری می‌کنند؛ در مطالعه‌ای که توسط جی ونگ و همکاران<sup>۱</sup> انجام شده است، حسگرهای فشار کریگامی ارائه شده، قابلیت استفاده در حوزه‌های مختلف مانند پزشکی (برای نظارت بر علائم حیاتی انسان)،

دستگاه‌های الکترونیکی، از جمله ساختارهایی هستند که در گذر زمان از این هنر ژاپنی بهره گرفته‌اند [۱۷-۱۹].



(الف)

(ب)

شکل ۲- الف) الگوی تا خوردن اوریکامی (Miura-Ori) (ب)

نمونه‌ای از الگوی برش کریگامی [۱۷].

ایده‌ی اولیه‌ی الهام از کریگامی در فناوری‌های مهندسی، در اوایل قرن ۲۱ مطرح شد. در طی این سال‌ها مهندسان با بررسی ساختارهای تا شونده و برش خورده، از کریگامی به عنوان یک روش طراحی مکانیکی برای ایجاد ساختارهای تغییر شکل پذیر بهره گرفتند درحالی که کاربرد حسگرهای آن هنوز در مراحل اولیه بود [۲۰]. ظهور حسگرهای کریگامی در کاربردهای الکترونیکی در سال‌های ۲۰۱۵-۲۰۱۸ رخ داد. در طی این سال‌ها محققان دریافتند که برش‌های طراحی شده در مواد می‌توانند خواص مکانیکی و الکترونیکی منحصر به فردی ایجاد کنند و از حسگرهای کریگامی به عنوان حسگرهای کشسان و الکترونیک‌های انعطاف پذیر بهره بگیرند. در این سال‌ها محققان شروع به بررسی استفاده از ساختارهای کریگامی برای ایجاد حسگرهای قابل ادغام در منسوجات با هدف پایش حرکات بدن و نظارت بر علائم حیاتی، کردند. از سال ۲۰۱۷ به بعد، حسگرهای کریگامی به طور مخصوص‌تری در نساجی و

<sup>1</sup> J. Wang et al

می‌شود. این حسگرها در نظارت بر دمای بدن بیمار و کنترل دما در فرایندهای تولید قابل استفاده هستند. مواد حساس به دما شامل: پلی وینیلیدین فلوراید<sup>۳</sup>، مواد سرامیکی مانند اکسیدهای فلزی و تیتانیوم دی اکسید، مواد نیمه هادی مانند سیلیکون و ژرمانیوم، گرافن و نانوکامپوزیت‌ها، فیبرهای نوری و غیره می‌باشد [۳۸-۴۱].

۳-۴ حسگر رطوبت: حسگرهای رطوبت برای اندازه‌گیری رطوبت محیط طراحی شده‌اند. در مطالعه‌ای که توسط ژانگ و همکاران<sup>۴</sup> صورت گرفته است، حسگر تشخیص دهنده‌ی رطوبت با ساختار کریگامی سطح مخصوص زیادی داشته و بر پایه‌ی مواد حساس به رطوبت می‌باشد. این حسگر قادر به تغییر خواص الکتریکی یا مکانیکی (مانند تغییر شکل و ازدیاد طول) در پاسخ به تغییرات رطوبت بوده و این تغییرات به صورت تغییرات مقاومت، ظرفیت یا ولتاژ اندازه‌گیری می‌شود. مواد حساس به رطوبت در مطالعه‌ی مذکور شامل: پلیمرهای حساس به رطوبت مانند پلی‌اکریلات‌ها و پلی‌استر، مواد سرامیکی، مواد نانوکامپوزیتی مانند نانولوله‌های کربن، نانوذرات اکسید فلزات، موادی مانند سیلیکاژل یا زئولیت، گرافن و سایر مواد کربنی، می‌باشد [۳۷-۴۲].

۳-۵ حسگر شیمیایی: حسگرهای شیمیایی، حسگرهای حساس به ترکیبات شیمیایی خاص یا آلاینده‌ها هستند. این حسگرها با طراحی کریگامی ساختارهای پیچیده و

رباتیک (برای حس کردن لمس، تماس و فشار) و سیستم‌های صنعتی (برای کنترل فشار) را نشان داد؛ در این مطالعه به روش‌های مختلف اندازه‌گیری فشار، مانند تغییرات مقاومت الکتریکی یا تغییرات ظرفیت خازن با استفاده از حسگرهای کریگامی پرداخته شده است [۳۴-۳۶].

۳-۲ حسگر کششی: حسگرهای کششی برای اندازه‌گیری میزان تغییر طول مواد مختلف استفاده می‌شوند. در مطالعه‌ای که توسط لیو و همکاران<sup>۱</sup> صورت گرفت، این حسگرها با سطوح مختلف سازگاری داشته، تغییرات بسیار کوچک در راستای کشش را شناسایی کرده و از مواد نرم و انعطاف پذیر ساخته شده‌اند. این حسگرها به وسیله‌ی تغییرات الکتریکی مانند تغییرات مقاومت، به اندازه‌گیری تنش کششی و ازدیاد طول حاصل از آن پرداخته‌اند [۳۷].

۳-۳ حسگر حرارتی: حسگرهای حرارتی به تغییرات دما پاسخ می‌دهند و در سیستم‌های حرارتی قابل استفاده هستند. تحقیقی که توسط لی و همکاران<sup>۲</sup> انجام شده است به بررسی حسگرهای حرارتی طراحی شده با استفاده از ساختارهای کریگامی پرداخته است. این حسگرها بر پایه‌ی مواد حساس به دما هستند و تغییرات دما را به تغییرات الکتریکی (مانند تغییر در جریان یا ولتاژ) تبدیل می‌کنند. همانگونه که در شکل ۳ نشان داده شده است، این تغییرات الکتریکی به آسانی اندازه‌گیری و به داده‌های دمایی تبدیل

<sup>3</sup> Polyvinylidene fluoride

<sup>4</sup> X. Zhanget al

<sup>1</sup> Y.Liu et al

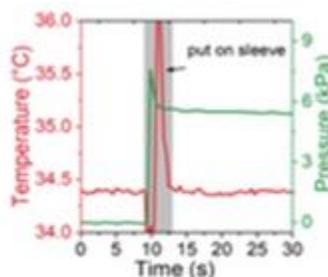
<sup>2</sup> S. H. Lee et al

نانو ذرات فلزی، نانولوله‌های کربن، پلیمرهای رسانا مانند پلی‌پیرول و پلی‌آنیلین، مواد سرامیکی و کامپوزیتی و مواد زیستی مانند آنزیم‌ها می‌باشد [۴۳-۴۵].

چندمنظوره داشته و به آسانی به تغییرات محیطی واکنش می‌دهند. این حسگرها در کاربردهای مختلف مانند تشخیص گازها، پی‌اچ سنجی و تشخیص ترکیبات زیستی قابل استفاده هستند. مواد قابل استفاده در این حسگرها شامل:



(الف)



(ب)

شکل ۳- الف) قرار گیری حسگر خازنی کریگامی روی ساعد. ب) تعیین دما ناشی از کرنش و فشار وارد شده بر حسگر کریگامی خازنی [۴۰].

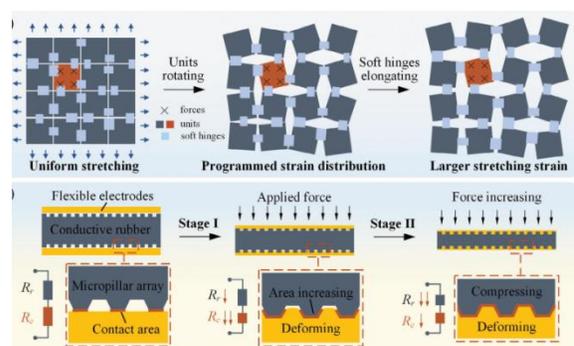
انعطاف پذیر دارند. مواد به کاررفته در این حسگرها شامل مواد فتوکرومیک، الکتروکرومیک و فیبر نوری می‌باشد [۴۶ و ۴۷]. بررسی مواد هوشمند پاسخگر، به صورت جامع به مواد پاسخگر نوری، تغییر فازی، هادی، رئولوژیکی و کریستال مایع تقسیم می‌شو که در منسوجات هوشمند به دو صورت تعبیه قطعات هوشمند بر روی آن و یا هوشمندسازی درجا تولید می‌شوند [۴۸]. از آنجایی که متداول‌ترین حسگرها، حسگرهای کششی و فشار می‌باشد، مختصراً به مرور مطالعات و بررسی ساختارهای طراحی شده در این زمینه می‌پردازیم.

۳-۶ حسگر حرکتی: حسگرهای حرکتی برای شناسایی حرکات و تغییر موقعیت حرکت، طراحی شده‌اند. این حسگرها به واسطه‌ی برش‌های کریگامی به آسانی تغییر شکل داده و حرکت می‌کنند. حسگر مذکور در ربات‌های نرم انعطاف پذیر، قابل استفاده بوده و برای شناسایی حرکت، فشار و انواع تغییرات در محیط اطراف به کار می‌روند. مواد قابل استفاده در طراحی این حسگرها شامل الیاف کربنی و آلیاژهای حافظه دار می‌باشد [۴۴].

۳-۷ حسگر نوری: حسگرهای نوری برای اندازه‌گیری شدت نور یا تغییرات نوری به کار می‌روند. این حسگرها به صورت مدولار (اتصال واحدها) طراحی شده و ساختار سبک و

ماو و همکاران<sup>۱</sup> با هدف طراحی یک آرایه حسگر کششی و با بهره‌گیری از الگوی کریگامی، نیروی کششی و خمشی را در اثر تغییر شکل ساختار محاسبه کرده‌اند. این ساختار سه لایه داشته و با چاپ نقره روی بستر پلی دی متیل سیلوکسان<sup>۲</sup>، الکتروود بالایی را تشکیل می‌دهد. لایه میانی یک لایه کشسان (از جنس لاستیک) و حساس به فشار بوده که بر روی الکتروود پایینی (مشابه الکتروود بالایی) قرار می‌گیرد. همانطور که در شکل ۴، نشان داده شده است، این آرایه‌ی حسگری متشکل از واحدهای ۷/۲ میلی متری بوده که در اثر کشش، واحدهای مربعی پیوسته در کناره‌ی اضلاع به وجود می‌آید. لایه میانی در این ساختار از مواد کشسان رسانا بوده و علاوه بر کشش، قابلیت تغییر شکل خمشی هم داشته است. این ساختار با کشش ۴۰٪ و خمش ۱۸۰ درجه، حساسیت ( $\Delta R/R_0$ )، ۰٫۰۳ و ۰٫۰۶، به ترتیب نشان داده است [۴۹].

خواص توپولوژیکی یک پلیمر تحت تاثیر ساختار فضایی و آرایش مولکولی آن می‌باشد. این خاصیت به نحوه‌ی چینش ملکول‌ها بستگی داشته و تاثیر زیادی بر رفتار فیزیکی و شیمیایی ماده در مقیاس میکرو و ماکرو دارد. سان و همکاران<sup>۳</sup>، با هدف توسعه‌ی حسگرهای کشسان با عملکرد دقیق‌تر از حسگرهای متداول، از الگوهای کریگامی و خواص



شکل ۴ - نحوه‌ی عملکرد آرایه حسگر کششی، فرایند

تغییر شکل آرایه‌ی حسگر در اثر اعمال کشش [۴۹]

<sup>3</sup> Process, Abstraction, Architecture, Mechanism- Process, Abstraction, Architecture

<sup>4</sup> Guo, Y. and Yang, Q

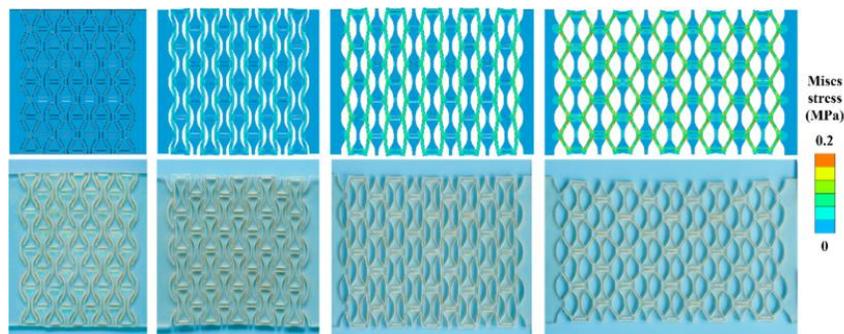
<sup>5</sup> gauge factor

<sup>6</sup> Sun et al.

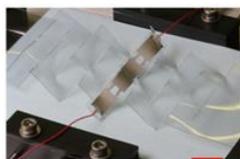
<sup>1</sup> Mao et al

<sup>2</sup> polydimethylsiloxane

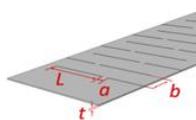
توپولوژیکی استفاده کرده‌اند.



شکل ۵- ساختار حسگر هیدروژل کریگامی و منحنی های مقعر آن [۱۳]



(الف)



(ب)

شکل ۶- الف) حسگر ساخته شده از الگوی برش خطی درمقیاس ۲ سانتی متر. ب) برش خطی ساده. L: طول برش، a: فاصله بین لبه‌های خطوط برش، b: فاصله بین خطوط برش، t: ضخامت لایه [۵۰].

رباط صلیبی قدامی<sup>۲</sup> نقش مهمی در ثبات و کنترل حرکات زانو دارد. آسیب‌های رباط صلیبی قدامی از شایع‌ترین آسیب‌ها در ورزشکاران و افراد با فعالیت بدنی بالا می‌باشد که می‌تواند منجر به اختلالات حرکتی و درد مزمن شود. یانگ، زیائوپنگ و همکاران<sup>۳</sup>، با طراحی کریگامی و برش‌های نعل اسبی، یک حسگر چند لایه متشکل از پلی وینیلیدین

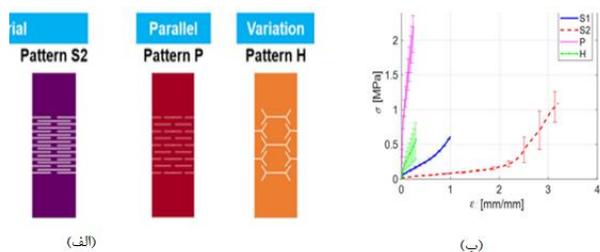
همانطور که در شکل ۶، نشان داده شده است، در این تحقیق از الکترودهای پلی وینیلیدین فلوراید<sup>۱</sup> توپولوژیکی برای بهبود خواص پیزوالکتریک استفاده شده است تا حساسیت بیشتری نسبت به حسگرهای معمولی داشته باشند. در این پژوهش ازدیاد طول ساختار از ۲٪-۱۰٪ با فرکانس ۱۰ هرتز، ولتاژ خروجی ۱،۵ ولت و دقت ۲،۶ برابری بیشتر از ولتاژ حسگرهای متداول را نشان داده است. با آزمایش‌های دینامیکی انجام شده روی حسگر نتیجه گرفته شد که ترکیب طراحی کریگامی و الکترودهای توپولوژیکی می‌تواند به ایجاد حسگرهای کشسان با عملکرد بهتر و دقیق‌تر کمک کند [۵۰].

<sup>2</sup> Anterior cruciate ligament (ACL)

<sup>3</sup> Yang, Xiaopeng, et al

<sup>1</sup> polyvinylidene fluoride

برای اندازه گیری ولتاژ خروجی و مطالعه‌ی چهارساختار کریگامی، ازدیاد طول و ولتاژ متناسب خروجی ساختارها، مورد بررسی قرار گرفت. چهار حسگر مذکور برپایه‌ی پلی وینیلیدن فلوراید بوده و همانطور که در شکل ۸، مشخص است، خواص الکترومکانیکی حسگر بستگی به الگوهای مختلف کریگامی داشته است.



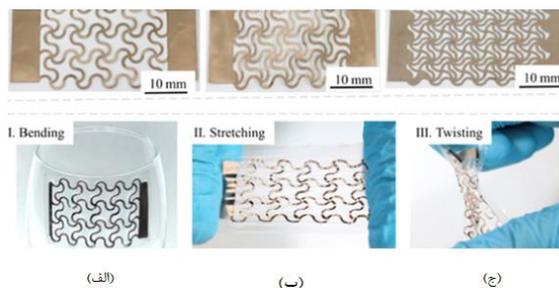
شکل ۸- الف) S1 و S2: برش‌های سری، P: برش موازی،

H: برش کندویی- ب) نمودار تنش- کرنش حاصل از چهار

حسگر نشان داده شده [۵۲]

بررسی‌های صورت گرفته نشان داده است که حداکثر ازدیاد طول حسگر، بستگی به دوام و عدم تغییر شکل حسگر در زمان کشش داشته و این محدودیت در فرایند ساخت مشخص می‌شود. همچنین برش‌های طولانی‌تر، تغییر طول بیشتر ایجاد کرده و از سوی دیگر موجب کاهش دوام و پارگی حسگر می‌شود [۵۲]. نمودار تنش- کرنش چهار حسگر طراحی شده در این مطالعه حاکی از رفتار متفاوت حسگرها باتوجه به الگوهای برش آنها می‌باشد. به طور کلی بیشترین کرنش در اثر برش خطوط سری و بیشترین ولتاژ خروجی در اثر برش‌های موازی حاصل شد [۵۲].

فلوراید<sup>۱</sup> و پلی دی متیل سیلوکسان<sup>۲</sup> طراحی کرده‌اند. این حسگر بر روی زانو قرار گرفته و با حرکت زانو، داده‌های مرتبط با کشش و فشار وارد شده بر واحدهای نعل اسبی را در اثر تغییر شکل ساختار، ثبت می‌کند. در این پژوهش تغییرات کششی و الاستیسیته‌ی ساختار بسته به مساحت حسگرها بوده و برای حسگرها با مساحت کم، مساحت متوسط، مساحت زیاد به ترتیب ۱۱۰٪، ۶۰٪، ۳۰٪ بود. هندسه ریز ساختار برای سه طرح مذکور در شکل ۷، مشخص شده است. این ساختارها علاوه بر قابلیت اندازه‌گیری نیروهای کششی و فشاری، امکان ارزیابی تغییر شکل‌های خمشی را نیز نشان دادند [۵۱].



شکل ۷- الف) حسگر با مساحت کم، ب) حسگر با مساحت متوسط، ج) حسگر با مساحت زیاد- خمش حسگر،

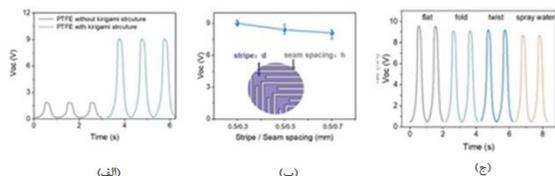
کشش حسگر، پیچش حسگر [۵۱]

کیم و همکاران<sup>۳</sup>، با هدف طراحی حسگرهای پوشیدنی موفق به تولید یک حسگر پیزوالکتریک با حساسیت ۲۹،۸۶ ولت بر سانتی‌متر، شدند. در این مطالعه، با طراحی یک مدار

<sup>۱</sup> Polyvinylidene fluoride

<sup>۲</sup> Polydimethylsiloxane

<sup>۳</sup> Kim, Y. G., et al.



شکل ۹- مشخصات حسگر اندازه گیری نیروی فشاری. الف) تاثیر طراحی های مختلف ساختار حسگر بر ولتاژ خروجی. ب) تاثیر فاصله ی بین برش ها بر عملکرد حسگر. ج) تغییرات ولتاژ حسگر در اثر تغییر شکل های مختلف (تاشدن، پیچش، تاثیر رطوبت و ...) [۵۳].

هوانگ و همکاران<sup>۶</sup>، به بررسی طراحی و تولید حسگرهای کششی با استفاده از نانوسیم های نقره با ضریب رعنائی بالا، پرداخته اند. این حسگرها به دلیل ساختار خاص کریگامی و کشسانی زیاد، قابلیت تغییر شکل در اندازه های مختلف را دارند. همانطور که در شکل ۱۰، نشان داده شده است، استفاده از الگوی کریگامی، کشش و انحنای ساختار را تغییر داده و ضریب رعنائی بالا در مواد استفاده شده، ویژگی های الکتریکی و حساسیت بالا در پاسخ به تغییر شکل های کوچک را ایجاد می کند. این ساختار علاوه بر بهبود عملکرد حسگر نسبت به حسگرهای متداول، طول عمر بیشتری داشته و گویای آن است که ترکیب فناوری نانو با طراحی های نوآورانه می تواند منجر به تولید حسگرها با عملکرد بالا و انعطاف پذیری بسیار مطلوب شود. از دیداد طول کمتر، گسیختگی ساختار و عملکرد پائین تر حسگرهای

اندازه گیری دقیق ضربان قلب و شکل موج ضربان دریافت شده در تشخیص بیماری های قلبی عروقی<sup>۱</sup> بسیار موثر می باشد. منگ و همکاران، با طراحی ساختار کریگامی مبتنی بر پلی تترا فلورو اتیلن<sup>۲</sup> و پلی اتیلن ترفتالات<sup>۳</sup> به عنوان لایه های تریبولکترویک<sup>۴</sup> و ایندیوم تین اکساید<sup>۵</sup> به عنوان الکتروود، موفق به ساخت حسگر فشاری برای تشخیص ضربان قلب و نظارت بر سلامت عمومی انسان شده اند. برش های عمودی به کار رفته در این ساختار منجر به افزایش حساسیت حسگر و افزایش چگالی بار سطحی شده و به دلیل سبکی، نازک بودن و شفافیت حسگر، در طیف وسیعی از کاربردها قابل استفاده می باشد. این ویژگی ها در نتیجه ی ساختار متمایز و خواص مواد در حسگر ایجاد می شود [۵۳].

همانطور که در شکل ۹، مشخص است، زمانی که از برش های کریگامی استفاده می شود، فشردگی و تغییر شکل لایه ی پلی تترا فلورو اتیلن بیشتر می شود؛ این ویژگی منجر به دریافت ولتاژ خروجی بالاتر نسبت به حسگرهای فشاری متداول، در زمان تغییر شکل می شود. در نهایت با تغییر فشار و فرکانس حسگر، عملکرد بهینه ی حسگر در فشار بهینه و فرکانس بهینه، به ترتیب ۰.۲۷ کیلو پاسکال و ۱ هرتز پیشنهاد شده است [۵۳].

<sup>1</sup> Cardiovascular diseases (CVDs)

<sup>2</sup> Poly(tetrafluoroethylene)

<sup>3</sup> Poly(ethylene terephthalate)

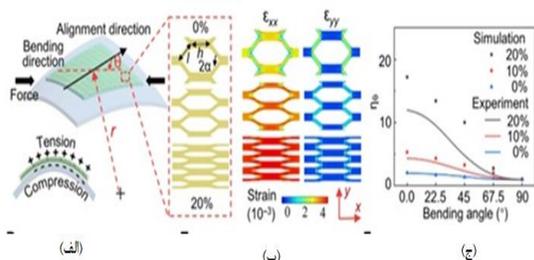
<sup>4</sup> Triboelectric

<sup>5</sup> Indium tin oxide

<sup>6</sup> Huang, Huiyan, et al

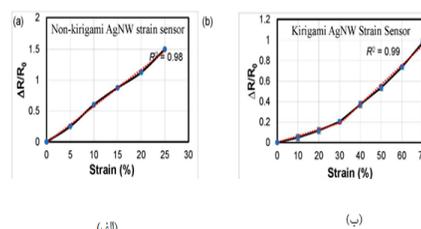
گسترش استفاده ازین ساختار را محدود کند. همانطور که در شکل ۱۱ ارائه شده است، برای تشخیص خواص پیزوالکتریک ناهمسانگرد در کامپوزیت شبکه‌ای مذکور، ابتدا اثرات جهت خمش و شعاع خمش بر پاسخ پیزوالکتریک بررسی شد. در این بررسی، برای تعیین کمیت ناهمسانگردی حسگر کریگامی، از شاخص  $\eta_{\theta}$  بهره گرفته اند که در آن  $V_{\theta}$  میانگین پیک ولتاژ مدار باز تحت زاویه‌ی خمش صفر درجه و  $V_{90}$  زاویه‌ی خمش ۹۰ درجه می‌باشد [۵۵].

$$\eta_{\theta} = \frac{V_{\theta}}{V_{90}}$$



شکل ۱۱- الف) شماتیکی از زاویه‌ی خمش و شعاع خمش در حسگر کامپوزیتی پیزوالکتریک با خواص ناهمسانگرد. ب) نتایج تحلیل المان محدود حسگر، تحت زاویه‌ی خمش  $0^{\circ}$  و  $90^{\circ}$  با کرنش اولیه‌ی ۰، ۱۰٪ و ۲۰٪ (شعاع خمش ۲۰ میلی‌متر است). ج) شبیه‌سازی و نتایج تجربی حاصل از بررسی خواص پیزوالکتریک [۴۵]

متداول از جمله عواملی است که برتری حسگر کریگامی را در این مطالعه نشان می‌دهد [۵۴].



شکل ۱۰- الف) عملکرد حسگر کششی متداول. ب) عملکرد حسگر کریگامی [۵۴].

هونگ، یینگ و همکاران<sup>۱</sup>، با بهره‌گیری از مواد پیزوسرامیکی مانند سرب زیرکونات تیتانات<sup>۲</sup> و دو لایه فیلم انعطاف پذیر پلی دی متیل سیلوکسان ساختاری کامپوزیتی ارائه داده‌اند که با اعمال فشار مکانیکی قادر به تولید بار الکتریکی می‌باشد. حسگر، حرکات مفصل زانو را رصد کرده و داده‌هایی درباره‌ی تنش‌های غیرعادی با الگوهای ناسالم حرکتی ارائه می‌دهد. علاوه بر انعطاف پذیری و تناسب لازم با شکل زانو، خواص ناهمسانگردی برای قابلیت تنظیم عملکرد را داشته است. سبک بودن، نازکی حسگر و بازخورد پیزوالکتریک در پاسخ به فشار بیش از حد یا حرکات نامناسب کاربر از دیگر مزایای این ساختار می‌باشد. در مقابل، پیچیدگی ساخت، دوام پائین در اثر برش‌ها و هزینه‌ی بالای این مواد، از جمله عواملی است که می‌تواند

<sup>1</sup> Hong, Ying, et al

<sup>2</sup> PZT

#### ۴. اصول طراحی حسگرهای کریگامی

اصول طراحی حسگرهای کریگامی بر کارایی و بهینه سازی فضای مورد استفاده توسط حسگرها تاثیر داشته و این اصول، استحکام ساختار را تضمین می‌کند. حرکت و تغییر شکل حسگر بدون در نظر گرفتن نیروهای وارد بر آن بایست به گونه‌ای باشد که حتی با ایجاد برش، پیوستگی ساختار حفظ شود؛ به این معنا که در هنگام تغییر شکل حسگر، نبایست شکاف یا گسیختگی رخ دهد. حرکت دو بعدی یا سه بعدی و تغییر شکل حسگرها با تغییر و طراحی الگوی برش قابل کنترل می‌باشد. دو نوع مطالعه بسته به نوع حرکت و تغییر شکل حسگرهای کریگامی بدون در نظر گرفتن نیروهای وارد بر آن وجود دارد. یکی از این مطالعات، مطالعه‌ی جامع<sup>۱</sup> با هدف تغییر شکل کلی و از پیش تعیین شده، برای تولید اشکال دو بعدی و سه بعدی از صفحات تخت می‌باشد. این نوع تغییر شکل کلی، به عنوان مورفینگ<sup>۲</sup> مورفینگ<sup>۲</sup> شناخته می‌شود. نوع دیگر مطالعه، مطالعه‌ی محدود یا اصطلاحاً محلی<sup>۳</sup> است که به حرکت قابل کنترل در نقاط خاصی از صفحات برش می‌پردازد [۲].

در تغییر شکل جامع اشکال کریگامی، می‌توان از روش‌های ساده و مؤثر مانند چرخش وجه‌های چندضلعی، استفاده کرد. در این روش با ایجاد برش‌های دقیق می‌توان یک

چندضلعی پیوسته را به مجموعه‌ای از اشکال برش خورده و پیوسته در کناره‌ی اضلاع تبدیل کرد. برش‌ها امکان آزادی سینماتیکی و آزادی حرکتی چند ضلعی را درون صفحه و خارج صفحه ایجاد می‌کنند. الگوهای برش کریگامی طیف گسترده‌ای دارند که دو طرح ساده به عنوان الگوهای کهن، شناخته می‌شوند. این الگوها به صورت برش‌های موازی و برش‌های متقاطع هستند و از آن‌ها برای توجیه اصول فیزیکی و زیربنای ساختار حسگر استفاده می‌شود [۲].

اتصال وجه‌ها از طریق کناره‌های خود به واحدهای مجاور، موجب می‌شود که اشکال کریگامی به صورت خارج از صفحه در اطراف واحدهای مجاور بچرخند و آزادی حرکتی بیشتری داشته باشند؛ برای مثال: صفحات متداول، انحنا‌ی گاوسی صفر دارند که با برش و تا کردن، اشکال سه بعدی با انحنا‌ی گاوسی غیر صفر ظاهر می‌شود [۵۸ و ۵۹]. اگر وجه‌های چندضلعی از طریق گوشه‌های خود به واحدهای مجاور متصل باشند، علاوه بر حرکت در داخل و خارج صفحه، می‌توانند به صورت دو بعدی (مثلاً تغییر شکل از مربع به دایره) یا سه بعدی (از سطح صاف به سطح زینی شکل) تغییر کنند [۶۰ و ۶۱].

علاوه بر تغییر شکل جامع، صفحات کریگامی می‌توانند با بهره‌گیری از الگوهای برش در نقاطی که با بخش‌های دیگر ساختار، پیوند دارند، حرکات قابل کنترلی در مکان‌های مشخص و انتخاب شده داشته باشند. در چنین الگوهایی از

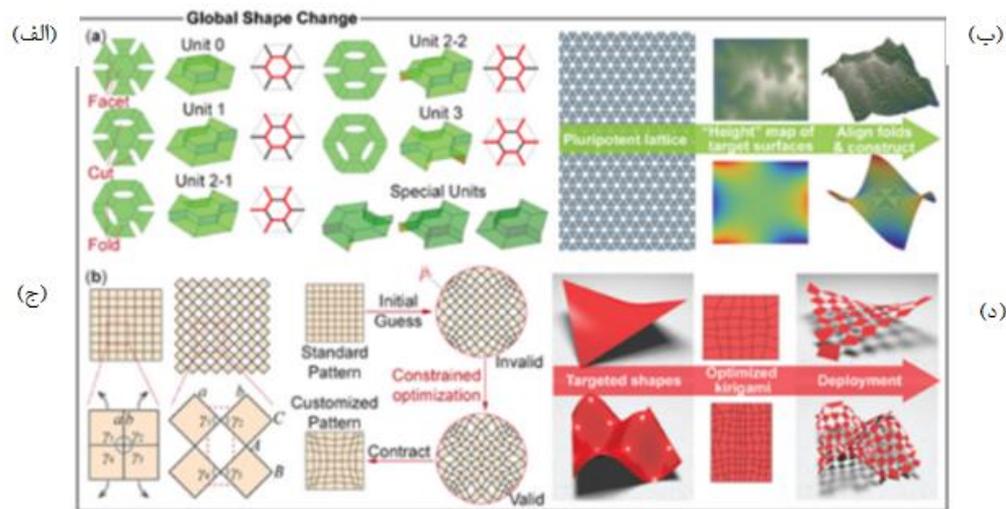
<sup>1</sup> Global

<sup>2</sup> Morphing

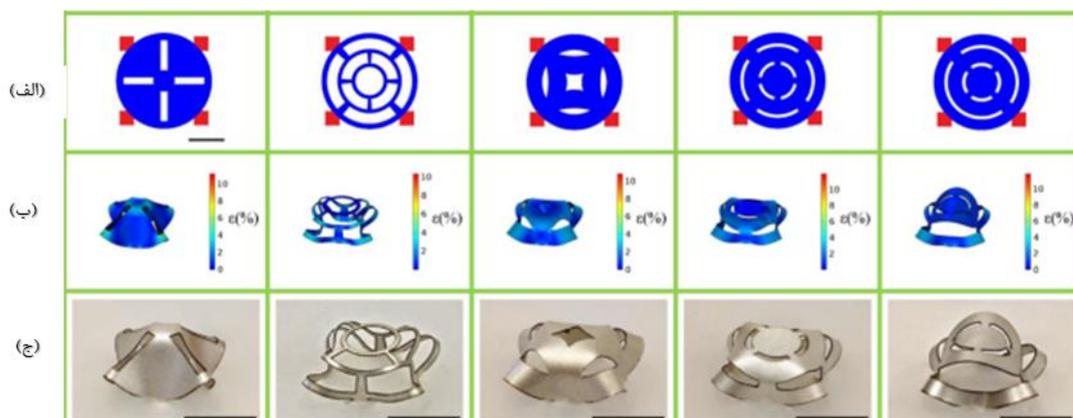
<sup>3</sup> Local

بالایی هستند. حسگرهای ساخته شده بر اساس الگوهای مختلف، تغییرات قابل توجهی در عملکرد نشان می‌دهند که نشان از آن است که تغییرات جزئی در الگوها می‌تواند منجر به عملکرد متفاوت حسگر شود [۲، ۶۲].

بخش‌های اتصال دهنده‌ی بلند و باریک استفاده می‌شود تا تغییر شکل دقیق برای انجام عمل مورد نظر به وجود آید. به عنوان مثال: حسگرهای تشخیص فشار و ضربان قلب که در شکل ۱۳، ارایه شده است، دارای ولتاژ و حساسیت خروجی



شکل ۱۲- تغییر شکل ساختار با استفاده از اصول کریگامی (الف) تغییر شکل وجه‌های کریگامی، چرخاندن و تبدیل واحدها به اشکال مختلف. (ب) تبدیل واحدها به یک شبکه‌ی جامع [۵۶] (ج) تغییر شکل جامع وجه‌های کریگامی که به صورت گوشه‌ای به هم متصل هستند. (د) نمونه‌هایی از تغییر شکل هندسه در اثر کشش. [۵۷]



شکل ۱۳- حسگر کریگامی فشاری با الگوهای مختلف. الف) پیش سازه‌های دو بعدی. ب) اندازه‌گیری ولتاژ خروجی حاصل از طرح‌های متفاوت. ج) اشکال سه بعدی حاصل از الگوهای دو بعدی [۶۲]

و همکاران<sup>۲</sup> انجام شد، نتیجه گرفته شد که رفتار برون‌گستر یک ساختار کریگامی با فرض صلب بودن وجوه برش‌خورده، مستقل از اندازه‌ی وجوه است و تنها به زاویه‌ی چرخش آن‌ها بستگی داشته و این نسبت بین ۰ و -۱، متغیر است [۶۳ و ۶۴]. حتی مواد بسیار سفت مانند گرافن می‌توانند با برش‌های کریگامی و ساختار لانه زنبوری به ساختار برون‌گستر تبدیل شوند [۶۵]. ساختار لانه زنبوری تولید شده در اثر برش‌های کریگامی با مواد مختلف مانند پلیمرهای حافظه دار، کامپوزیت‌های فلزی و الیافی و پلی‌اتراترکتون می‌تواند برای ایجاد رفتار انبساط چندجهته استفاده شود [۶۶-۶۸].

بسیاری از مواد الکترونیکی و کامپوزیتی کشسان نیستند؛ از این رو در کاربردهایی مانند باتری‌های تغییر شکل‌پذیر یا

اصول طراحی ساختارهای کریگامی به ما امکان تولید ساختارهای فوق کشسان، پایدار در چند جهت و امکان تولید ساختار با خاصیت انبساط پذیری در تمام جهات را می‌دهد. برون‌گسترها<sup>۱</sup> موادی با نسبت پواسون منفی هستند که در اثر وارد کردن نیروی کششی در جهت عمود بر یک سازه، به جای کاهش ابعاد در راستای دیگر، در همان جهت انبساط می‌یابد. دو مکانیزم مختلف برای حسگرهای کریگامی وجود دارد که در آن می‌توانند رفتار انبساط پذیر یا آگزیٹیک از خود نشان دهند. اولین مکانیزم، چرخش وجوه بسته به الگوی برش می‌باشد که به اختصار بررسی کردیم و دومین مکانیزم، تبدیل برش‌ها و الگوی کریگامی به ساختارهای لانه زنبوری است. در چنین ساختاری با ایجاد برش‌های متقاطع می‌توان یک ساختار دو بعدی با نسبت پواسون منفی طراحی کرد [۲]. در مطالعه‌ای که توسط گریم

<sup>2</sup> Grima et al.

<sup>3</sup> Polyether ether ketone

<sup>1</sup> Auxetics

رباتیک نرم نمی‌توان از آن‌ها استفاده کرد. با اعمال اصول کریگامی روی مواد سفت مانند گرافن، نانو ورق‌های نیتريد بور، دی سولفید مولیبدن<sup>۱</sup>، فلزات و صفحات دو بعدی فسفرن<sup>۲</sup>، می‌توان ساختار فوق کشسان و انعطاف پذیری ساخت که باتوجه به کاربرد، تولید و استفاده شوند [۶۹-۷۲]. علاوه بر رفتار کشسان و خواص آگرتیک ساختارهای کریگامی، پدیده‌ی کمانش از تغییر شکل‌های قابل بررسی می‌باشد. کمانش معمولاً زمانی اتفاق می‌افتد که یک سازه‌ی باریک تحت فشار طولی بوده و با رسیدن به حد بحرانی (بسته به سفتی نمونه طبق نمودار نیرو-ازدیاد طول)، ناپایداری الاستیک در تعادل اولیه رخ داده و ساختار را مجبور می‌کند تا به سمت تغییر شکل و حالت پایدار پیش رود. این پدیده از الگوی برش نشات گرفته که در اثر انتقال کشش درون صفحه روی وجوه، فشردگی موضعی را به وجود می‌آورد؛ در نتیجه زمانی که کشش درون صفحه به حد بحرانی می‌رسد، صفحات کریگامی بسته به الگوی برش در بخش‌های باریک یا وجوه دارای کمانش و تغییر شکل خارج از صفحه می‌شوند [۲].

از سری کاربردهای حسگرهای کریگامی می‌توان به :

قطعات الکترونیکی انعطاف پذیر: ساختارهای جدید کریگامی علاوه بر محرکه‌ی مکانیکی، تحت تاثیر محرکه‌های حرارتی، الکترومغناطیسی، اجزای الکتریکی یا بیوشیمیایی هستند که

از این ویژگی‌ها می‌توان برای تولید نسل جدید حسگرها استفاده کرد. به این منظور، آشنایی با طراحی و اصول کریگامی یک مزیت قابل توجه محسوب می‌شود. از آنجایی که ساختار کریگامی متشکل از صفحات نازک و مسطح می‌باشد، می‌توان با ساخت فیلم چندلایه از مواد بیوشیمیایی یا الکتریکی و برش آن‌ها در ابعاد مختلف، انواع ساختار انعطاف پذیر را داشت. این مواد بدون نیاز به محرکه مکانیکی، توانایی تغییر خواص کریگامی را داشته و با ایجاد تغییر شکل و خواص جدید، طرح جدیدی بر ساختار کریگامی ایجاد می‌کنند [۲، ۷۳-۷۴].

حسگرهای پوشیدنی: در ورزش حرفه‌ای، فعالیت‌های رباتیک، توانبخشی پزشکی و نظارت بر سلامت اشخاص، به حسگرهای قوی برای ثبت و نظارت بر حرکات بخش‌های مختلف بدن مانند حرکت آرنج و شانه نیاز است؛ با این حال توسعه حسگرهای پوشیدنی برای انجام چنین وظایفی چالش برانگیز است؛ زیرا حسگرها باید دامنه‌ی حرکتی گسترده داشته و با چسبندگی مناسب به اعضای بدن، در انجام فعالیت‌های روزمره ایجاد مزاحمت نکند. به این منظور کریگامی به دلیل کشسانی زیاد و تغییر شکل قابل پیش‌بینی می‌تواند یک ساختار میزبان ایده آل برای جایگزینی با حسگرهای پوشیدنی متداول باشد [۲۷ و ۲۸، ۷۵-۷۸].

<sup>1</sup> MoS<sub>2</sub>

<sup>2</sup> 2D Phosphorene

مانند رباتیک نرم و انواع حسگرهای پوشیدنی قابل کاربرد است و تاثیرات قابل توجهی بر عملکرد صنایع استراتژیک و زندگی روزمره دارد. این پتانسیل قابل بهره برداری، دارای چالش‌هایی می‌باشد که بایست به آن پرداخته شود:

اول آنکه مطالعه بر عملکرد دینامیکی کریگامی یک حوزه‌ی باز محسوب می‌شود و نیاز به تحقیقات بیشتر در این زمینه است. با این حال تطبیق پذیری بالای ساختارهای کریگامی می‌تواند فرصت‌های جدیدی ایجاد کند [۲].

موضوع قابل بحث و بررسی دیگر، طراحی معکوس این ساختارها است. توجه شود که تحقیقات و مطالعات بررسی شده در این مقاله، مشتقات دو الگوی برش قدیمی (برش‌های موازی و متقاطع) می‌باشد. این الگوهای برش به صورت موردی قابل استفاده هستند و استفاده از توزیع برش‌ها در الگوهای کریگامی می‌تواند به اشکال مختلف تولید شود پس نیازمند یک روش اساسی برای طراحی معکوس ساختار کریگامی و ایجاد برش‌ها هستیم که فراتر از دانسته‌ها، پیش‌بینی و کنترل حرکت ساختارهای متداول می‌باشد [۲]. ساختارهای کریگامی به واسطه‌ی دقت و عملکرد بهتر، بر ساختارهای متداول ارجحیت پیدا کرده و به منظور پایداری و بهینه‌سازی این ساختارها، بایست چالش‌های مذکور برطرف شود.

## ۶. نتیجه‌گیری

دو رویکرد متفاوت برای استفاده از حسگرهای کریگامی وجود دارد؛ اولین رویکرد قرار دادن حسگرهای متداول روی ساختار کریگامی می‌باشد. برای مثال موریکاوا و همکاران<sup>۱</sup>، یک حسگر کریگامی به شکل دونات و بر پایه‌ی مواد زیستی طراحی کردند. این حسگر، سیگنال الکترومایوگرافی<sup>۲</sup> بافت‌های عضلانی بدن را اندازه‌گیری کرده و به واسطه‌ی قابلیت کشسانی زیاد کریگامی می‌زبان، عملکرد این حسگر زیستی را بهبود می‌بخشد. همچنین ناصافی سطح حسگر کریگامی، چسبندگی لازم را در سطح تماس بین حسگر و بدن ایجاد کرده و دقت لازم را به وجود آورده است [۷۹ و ۸۰]. رویکرد دیگر، اعمال مستقیم برش‌های کریگامی روی حسگر یا مواد حسگر می‌باشد. به عنوان مثال زو و همکاران<sup>۳</sup>، با ایجاد برش توسط لیزر روی سطح گرافنی و فیلم پلی‌آمیدی، موفق به ساخت یک حسگر کریگامی کششی شدند. در این ساختار، برش‌های کریگامی به گرافن انعطاف پذیری کافی می‌دهد تا در اثر تغییر شکل، مقاومت الکتریکی را به میزان قابل توجهی تغییر دهد. این حسگر کششی، شامل یک لایه پلی‌آمید، یک لایه گرافن و الکترودهای نقره در انتهای آن است [۳].

## ۵. چالش‌ها و محدودیت‌ها

بدون شک هنر باستانی برش کاغذ، الهام بخش تحقیقات مهندسی می‌باشد. اصول کریگامی در رشته‌های نوظهور

<sup>1</sup> Morikawa et al

<sup>2</sup> EMG: Electromyography

<sup>3</sup> Xu et al.

تغییر شکل‌ها)، به طور قابل توجهی تغییرات مقاومت یا تغییر شکل حرکتی، تغییر رنگ و... بسته به مواد اولیه و ساختار از خود نشان می‌دهد. با پارامترهای مذکور، ویژگی‌های الکتروترمال در هر مطالعه ذکر شده و این نشان از تابعی از افزایش ازدیاد طول بسته به نوع حساسیت طراحی شده می‌باشد. این مقاله به صورت منحصر و مختصر به بررسی بحث الکترونیک حسگرهای قابل استفاده و کاربردهای مختلف آن پرداخته است. انعطاف پذیری، کاهش وزن و کاهش هزینه، استفاده از مواد سبک وزن، کاربردهای متنوع و دقت بالاتر این حسگرها نسبت به حسگرهای عادی موجب شده است که از حسگرهای کریگامی به عنوان حسگرهای چندکاره استفاده شود. حسگرهای کریگامی نمایانگر یک جهش نوآورانه در این زمینه هستند و با رفع چالش‌ها و محدودیت‌های این زمینه می‌توان به کاربردهای بیشتری از آن‌ها دست یافت.

## ۷. مراجع

- [1] J. J. Park, P. Won, and S. H. Ko, "A Review on Hierarchical Origami and Kirigami Structure for Engineering Applications," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology*, vol. 6, no. 1, pp. 147–161, 2019, doi: 10.1007/s40684-019-00027-2.
- [2] J. Tao, H. Khosravi, V. Deshpande, and S. Li, "Engineering by Cuts: How Kirigami Principle Enables Unique Mechanical Properties and

این مقاله به صورت خلاصه به بررسی تاریخچه، بررسی اصول، انواع مواد قابل استفاده، تحقیقات انجام شده و تئوری تاثیر الگوی برش بر ساختار و عملکرد حسگر پرداخته است. حسگرهای کریگامی که براساس اصول طراحی و ساختارهای کاغذی است به عنوان یکی از روش‌های نوآورانه در زمینه‌ی حسگرها و فناوری‌های مرتبط می‌باشد. این حسگرها به دلیل کشسانی زیاد و خاصیت تطبیق‌پذیری بالا، می‌توانند در کاربردهای مختلفی مانند رباتیک، نظارت بر سلامت، دستگاه‌های پوشیدنی انعطاف پذیر و غیره مورد استفاده قرار بگیرند. مطالعات و یافته‌های ذکر شده در این مقاله، از طراحی حسگرها با ویژگی‌های چندوجهی بهره گرفته و -در صورت امکان- در سه بعد طراحی شده‌اند. طبق مطالعات و یافته‌های ارائه شده، طراحی کریگامی دارای رابطه‌ی تنش-کرنش بوده، به این معنی که با قرارگیری در حالات مختلف (حالت صاف، چین خورده، جمع شده و انواع

Functionalities," *Advanced Science*, vol. 10, no. 1, p. 2204733, 2023, doi: 10.1002/advs.202204733.

[3] K. Xu, Y. Lu, S. Honda, T. Arie, S. Akita, and K. Takei, "Highly stable kirigami-structured stretchable strain sensors for perdurable wearable electronics," *J Mater Chem C Mater*, vol. 7, no. 31, pp. 9609–9617, 2019, doi: 10.1039/c9tc01874c.

[4] Q. Zhang et al., "Origami and kirigami inspired self-folding for programming three-dimensional shape shifting of polymer sheets

- with light,” *Extreme Mech Lett*, vol. 11, pp. 111–120, 2017, doi: 10.1016/j.eml.2016.08.004.
- [5] R. Xu et al., “Breathable Kirigami-Shaped Ionotronic e-Textile with Touch/Strain Sensing for Friendly Epidermal Electronics,” *Advanced Fiber Materials*, vol. 4, no. 6, pp. 1525–1534, 2022, doi: 10.1007/s42765-022-00186-z.
- [6] B. M. Li, I. Kim, Y. Zhou, A. C. Mills, T. J. Flewellin, and J. S. Jur, “Kirigami-inspired textile electronics: KITE,” *Adv Mater Technol*, vol. 4, no. 11, p. 1900511, 2019.
- [7] D. Thesiya, A. R. Srinivas, and P. Shukla, “A Novel Lateral Deployment Mechanism for Segmented Mirror/Solar Panel of Space Telescope,” *Journal of Astronomical Instrumentation*, vol. 4, no. 3–4, p. 1550006, 2015, doi: 10.1142/S2251171715500063.
- [8] X. Guo et al., “Two- and three-dimensional folding of thin film single-crystalline silicon for photovoltaic power applications,” *Proc Natl Acad Sci U S A*, vol. 106, no. 48, pp. 20149–20154, 2009, doi: 10.1073/pnas.0907390106.
- [9] S. Zhang et al., “Coaxial 3D-Printed and kirigami-inspired deployable wearable electronics for complex body surfaces,” *Compos Sci Technol*, vol. 216, p. 109041, 2021, doi: 10.1016/j.compscitech.2021.109041.
- [10] C. Zeng et al., “Kirigami-inspired organic and inorganic film-based flexible thermoelectric devices with built-in heat sink,” *Nano Energy*, vol. 121, p. 109213, 2024, doi: 10.1016/j.nanoen.2023.109213.
- [11] L. Ge, S. Wang, X. Song, S. Ge, and J. Yu, “3D Origami-based multifunction-integrated immunodevice: Low-cost and multiplexed sandwich chemiluminescence immunoassay on microfluidic paper-based analytical device,” *Lab Chip*, vol. 12, no. 17, pp. 3150–3158, 2012, doi: 10.1039/c2lc40325k.
- [12] B. Y. Ahn, D. Shoji, C. J. Hansen, E. Hong, D. C. Dunand, and J. A. Lewis, “Printed origami structures,” *Advanced Materials*, vol. 22, no. 20, pp. 2251–2254, 2010, doi: 10.1002/adma.200904232.
- [13] Y. Guo and Q. Yang, “Design of a Highly Sensitive Ionic Conductive Hydrogel Sensor based on the Kirigami Structure,” in *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, 2023, p. 12033. doi: 10.1088/1742-6596/2553/1/012033.
- [14] N. S. Jang, K. H. Kim, S. H. Ha, S. H. Jung, H. M. Lee, and J. M. Kim, “Simple Approach to High-Performance Stretchable Heaters Based on Kirigami Patterning of Conductive Paper for Wearable Thermotherapy Applications,” *ACS Appl Mater Interfaces*, vol. 9, no. 23, pp. 19612–19621, 2017, doi: 10.1021/acsami.7b03474.
- [15] M. K. Blees et al., “Graphene kirigami,” *Nature*, vol. 524, no. 7564, pp. 204–207, 2015, doi: 10.1038/nature14588.

- [16] T. C. Hull, *Origami design secrets: mathematical methods for an ancient art*, vol. 27, no. 2. CRC Press, 2005. doi: 10.1007/BF02985811.
- [17] Z. Song, *Studies of Origami and Kirigami and Their Applications*. Arizona State University, 2016.
- [18] Y. Chen, J. Au, P. Kazlas, A. Ritenour, H. Gates, and M. McCreary, "Flexible active-matrix electronic ink display," *Nature*, vol. 423, no. 6936, p. 136, 2003, doi: 10.1038/423136a.
- [19] D. H. Kim et al., "Stretchable and foldable silicon integrated circuits," *Science* (1979), vol. 320, no. 5875, pp. 507–511, 2008, doi: 10.1126/science.1154367.
- [20] E. A. Peraza-Hernandez, D. J. Hartl, R. J. Malak, and D. C. Lagoudas, "Origami-inspired active structures: A synthesis and review," *Smart Mater Struct*, vol. 23, no. 9, p. 94001, 2014, doi: 10.1088/0964-1726/23/9/094001.
- [21] Z. Song et al., "Kirigami-based stretchable lithium-ion batteries," *Sci Rep*, vol. 5, no. 1, p. 10988, 2015.
- [22] P. Won et al., "Stretchable and Transparent Kirigami Conductor of Nanowire Percolation Network for Electronic Skin Applications," *Nano Lett*, vol. 19, no. 9, pp. 6087–6096, 2019, doi: 10.1021/acs.nanolett.9b02014.
- [23] Z. Zhang et al., "Kirigami-Inspired Stretchable Conjugated Electronics," *Adv Electron Mater*, vol. 6, no. 1, p. 1900929, 2020, doi: 10.1002/aelm.201900929.
- [24] 박정재, "Transparent Kirigami Electrodes for Electronic Skin Applications," 2019, 서울대학교 대학원
- [25] J. S. Meena, S. Bin Choi, S. B. Jung, and J. W. Kim, "Electronic textiles: New age of wearable technology for healthcare and fitness solutions," *Mater Today Bio*, vol. 19, p. 100565, 2023, doi: 10.1016/j.mtbio.2023.100565.
- [26] M. Stoppa and A. Chiolerio, "Wearable electronics and smart textiles: A critical review," *Sensors (Switzerland)*, vol. 14, no. 7, pp. 11957–11992, 2014, doi: 10.3390/s140711957.
- [27] R. R. Ruckdashel, N. Khadse, and J. H. Park, "Smart E-Textiles: Overview of Components and Outlook," *Sensors*, vol. 22, no. 16, p. 6055, 2022, doi: 10.3390/s22166055.
- [28] G. Oatley, T. Choudhury, and P. Buckman, "Smart textiles for improved quality of life and cognitive assessment," *Sensors*, vol. 21, no. 23, p. 8008, 2021, doi: 10.3390/s21238008.
- [29] C. Gonçalves, A. F. da Silva, J. Gomes, and R. Simoes, "Wearable e-textile technologies: A review on sensors, actuators and control elements," *Inventions*, vol. 3, no. 1, p. 14, 2018, doi: 10.3390/inventions3010014.

- [30] A. S. Muhammad Sayem, S. Hon Teay, H. Shahariar, P. Luise Fink, and A. Albarbar, "Review on smart electro-clothing systems (SeCSs)," *Sensors*, vol. 20, no. 3, p. 587, 2020.
- [31] T. M. Fernández-Caramés and P. Fraga-Lamas, "Towards the internet-of-smart-clothing: A review on IoT wearables and garments for creating intelligent connected E-textiles," *Electronics (Switzerland)*, vol. 7, no. 12, p. 405, 2018, doi: 10.3390/electronics7120405.
- [32] K. Cherenack and L. Van Pieteron, "Smart textiles: Challenges and opportunities," *J Appl Phys*, vol. 112, no. 9, 2012.
- [33] J. Shi et al., "Smart Textile-Integrated Microelectronic Systems for Wearable Applications," *Advanced Materials*, vol. 32, no. 5, p. 1901958, 2020, doi: 10.1002/adma.201901958.
- [34] X. Liu, C. Li, Z. Wang, Y. Li, J. Huang, and H. Yu, "Wide-Range Flexible Capacitive Pressure Sensors Based on Origami Structure," *IEEE Sens J*, vol. 21, no. 8, pp. 9798–9807, 2021, doi: 10.1109/JSEN.2021.3058275.
- [35] J. H. Low, P. S. Chee, E. H. Lim, and V. Ganesan, "Kirigami-inspired self-powered pressure sensor based on shape fixation treatment in IPMC material," *Smart Mater Struct*, vol. 33, no. 2, p. 25029, 2024, doi: 10.1088/1361-665X/ad1def.
- [36] W. Chen, L. X. Liu, H. Bin Zhang, and Z. Z. Yu, "Kirigami-Inspired Highly Stretchable, Conductive, and Hierarchical Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>MXene Films for Efficient Electromagnetic Interference Shielding and Pressure Sensing," *ACS Nano*, vol. 15, no. 4, pp. 7668–7681, 2021, doi: 10.1021/acsnano.1c01277.
- [37] X. Chen, Y. Li, X. Wang, and H. Yu, "Origami Paper-Based Stretchable Humidity Sensor for Textile-Attachable Wearable Electronics," *ACS Appl Mater Interfaces*, vol. 14, no. 31, pp. 36227–36237, 2022, doi: 10.1021/acscami.2c08245.
- [38] Y. Zhao et al., "Thermal Emission Manipulation Enabled by Nano-Kirigami Structures," *Small*, vol. 20, no. 3, p. 2305171, 2024, doi: 10.1002/sml.202305171.
- [39] J. H. Kim, S. E. Lee, and B. H. Kim, "Applications of flexible and stretchable three-dimensional structures for soft electronics," *Soft Science*, vol. 3, no. 2, p. N-A, 2023, doi: 10.20517/ss.2023.07.
- [40] Y. Yu, S. Peng, M. Islam, S. Wu, and C. H. Wang, "Wearable Supercapacitive Temperature Sensors with High Accuracy Based on Ionically Conductive Organogel and Macro-Kirigami Electrode," *Adv Mater Technol*, vol. 8, no. 4, p. 2201020, 2023, doi: 10.1002/admt.202201020.
- [41] T. Noushin and S. Tabassum, "Kirigami-Shaped Dual-Functional Strain and Temperature Sensors for Monitoring Body Movements and Hyperthermia Toward Physiotherapy Applications," *IEEE Sens J*, vol. 24, no. 6, pp.

- 7253–7263, 2024, doi: 10.1109/JSEN.2023.3272622.
- [42] Z. Yu et al., “Bio-inspired Copper Kirigami Motifs Leading to a 2D–3D Switchable Structure for Programmable Fog Harvesting and Water Retention,” *Adv Funct Mater*, vol. 33, no. 5, p. 2210730, 2023, doi: 10.1002/adfm.202210730.
- [43] N. Colozza, V. Caratelli, D. Moscone, and F. Arduini, “Origami paper-based electrochemical (bio) sensors: State of the art and perspective,” *Biosensors (Basel)*, vol. 11, no. 9, p. 328, 2021.
- [44] M. Zhang et al., “Time-space-resolved origami hierarchical electronics for ultrasensitive detection of physical and chemical stimuli,” *Nat Commun*, vol. 10, no. 1, p. 1120, 2019, doi: 10.1038/s41467-019-09070-8.
- [45] R. Tabassian, M. Mahato, S. Nam, V. H. Nguyen, A. Rajabi-Abhari, and I. K. Oh, “Electro-Active and Photo-Active Vanadium Oxide Nanowire Thermo-Hygroscopic Actuators for Kirigami Pop-up,” *Advanced Science*, vol. 8, no. 23, p. 2102064, 2021, doi: 10.1002/advs.202102064.
- [46] W. Wang et al., “Kirigami/Origami-Based Soft Deployable Reflector for Optical Beam Steering,” *Adv Funct Mater*, vol. 27, no. 7, p. 1604214, 2017, doi: 10.1002/adfm.201604214.
- [47] Z. Shen et al., “Soft Origami Optical-Sensing Actuator for Underwater Manipulation,” *Front Robot AI*, vol. 7, p. 616128, 2021, doi: 10.3389/frobt.2020.616128.
- [48] رامین, ر.ر. ز. زعیم, یعقوبی, کاملیا, خواجهی علوم و “مروری بر کاربرد مواد هوشمند در منسوجات فناوری نساجی و پوشاک,” *فناوری نساجی و پوشاک*, vol. 12, no. 4, pp. 107–135, 2024.
- [49] C. Mao, J. Jin, D. Mei, and Y. Wang, “Development of Kirigami-Patterned Stretchable Tactile Sensor Array with Soft Hinges for Highly Sensitive Force Detection (Adv. Sensor Res. 8/2024),” *Advanced Sensor Research*, vol. 3, no. 8, p. 202470023, 2024, doi: 10.1002/adsr.202470023.
- [50] R. Sun et al., “Kirigami stretchable strain sensors with enhanced piezoelectricity induced by topological electrodes,” *Appl Phys Lett*, vol. 112, no. 25, 2018, doi: 10.1063/1.5025025.
- [51] X. Yang et al., “Knee function assessment of anterior cruciate ligament injury with a Kirigami buckling-resistant stretchable sensor,” *SmartMat*, vol. 5, no. 5, p. e1271, 2024, doi: 10.1002/smm2.1271.
- [52] Y. G. Kim, J. H. Song, S. Hong, and S. H. Ahn, “Piezoelectric strain sensor with high sensitivity and high stretchability based on kirigami design cutting,” *npj Flexible Electronics*, vol. 6, no. 1, p. 52, 2022, doi: 10.1038/s41528-022-00186-4.

- [53] K. Meng et al., "Kirigami-Inspired Pressure Sensors for Wearable Dynamic Cardiovascular Monitoring," *Advanced Materials*, vol. 34, no. 36, p. 2270258, 2022, doi: 10.1002/adma.202202478.
- [54] H. Huang, C. J. Cai, B. S. Yeow, J. Ouyang, and H. Ren, "Highly stretchable and kirigami-structured strain sensors with long silver nanowires of high aspect ratio," *Machines*, vol. 9, no. 9, p. 186, 2021, doi: 10.3390/machines9090186.
- [55] Y. Hong et al., "Highly anisotropic and flexible piezoceramic kirigami for preventing joint disorders," *Sci Adv*, vol. 7, no. 11, p. eabf0795, 2021, doi: 10.1126/SCIADV.ABF0795.
- [56] D. M. Sussman et al., "Algorithmic lattice kirigami: A route to pluripotent materials," *Proc Natl Acad Sci U S A*, vol. 112, no. 24, pp. 7449–7453, 2015, doi: 10.1073/pnas.1506048112.
- [57] G. P. T. Choi, L. H. Dudte, and L. Mahadevan, "Programming shape using kirigami tessellations," *Nat Mater*, vol. 18, no. 9, pp. 999–1004, 2019, doi: 10.1038/s41563-019-0452-y.
- [58] T. Hull, *Project origami: Activities for exploring mathematics*, second edition. CRC Press, 2012.
- [59] T. Castle et al., "Making the cut: Lattice kirigami rules," *Phys Rev Lett*, vol. 113, no. 24, p. 245502, 2014, doi: 10.1103/PhysRevLett.113.245502.
- [60] H. Khosravi, S. M. Iannucci, and S. Li, "Pneumatic Soft Actuators With Kirigami Skins," *Front Robot AI*, vol. 8, p. 749051, 2021, doi: 10.3389/frobt.2021.749051.
- [61] Y. Tang, Y. Li, Y. Hong, S. Yang, and J. Yin, "Programmable active kirigami metasheets with more freedom of actuation," *Proc Natl Acad Sci U S A*, vol. 116, no. 52, pp. 26407–26413, 2019, doi: 10.1073/pnas.1906435116.
- [62] Y. Zhang et al., "Kirigami-inspired, three-dimensional piezoelectric pressure sensors assembled by compressive buckling," *npj Flexible Electronics*, vol. 8, no. 1, p. 23, 2024, doi: 10.1038/s41528-024-00310-6.
- [63] J. N. Grima, P. S. Farrugia, C. Caruana, R. Gatt, and D. Attard, "Auxetic behaviour from stretching connected squares," *J Mater Sci*, vol. 43, no. 17, pp. 5962–5971, 2008, doi: 10.1007/s10853-008-2765-0.
- [64] J. N. Grima and K. E. Evans, "Auxetic behavior from rotating triangles," *J Mater Sci*, vol. 41, no. 10, pp. 3193–3196, 2006, doi: 10.1007/s10853-006-6339-8.
- [65] K. Cai, J. Luo, Y. Ling, J. Wan, and Q. H. Qin, "Effects of size and surface on the auxetic behaviour of monolayer graphene kirigami," *Sci Rep*, vol. 6, no. 1, p. 35157, 2016, doi: 10.1038/srep35157.

- [66] Z. Li, Q. Yang, R. Fang, W. Chen, and H. Hao, "Crushing performances of Kirigami modified honeycomb structure in three axial directions," *Thin-Walled Structures*, vol. 160, p. 107365, 2021, doi: 10.1016/j.tws.2020.107365.
- [67] K. Virk et al., "SILICOMB PEEK Kirigami cellular structures: Mechanical response and energy dissipation through zero and negative stiffness," *Smart Mater Struct*, vol. 22, no. 8, p. 84014, 2013, doi: 10.1088/0964-1726/22/8/084014.
- [68] R. M. Neville et al., "A Kirigami shape memory polymer honeycomb concept for deployment," *Smart Mater Struct*, vol. 26, no. 5, p. 05LT03, 2017, doi: 10.1088/1361-665X/aa6b6d.
- [69] T. Han, F. Scarpa, and N. L. Allan, "Super stretchable hexagonal boron nitride Kirigami," *Thin Solid Films*, vol. 632, pp. 35–43, 2017, doi: 10.1016/j.tsf.2017.03.059.
- [70] S. Kumar, T. Mishra, and A. Mahata, "Manipulation of mechanical properties of monolayer molybdenum disulfide: Kirigami and hetero-structure based approach," *Mater Chem Phys*, vol. 252, p. 123280, 2020, doi: 10.1016/j.matchemphys.2020.123280.
- [71] S. H. Chen, K. C. Chan, T. M. Yue, and F. F. Wu, "Highly stretchable kirigami metallic glass structures with ultra-small strain energy loss," *Scr Mater*, vol. 142, pp. 83–87, 2018, doi: 10.1016/j.scriptamat.2017.08.037.
- [72] T. C. Shyu et al., "A kirigami approach to engineering elasticity in nanocomposites through patterned defects," *Nat Mater*, vol. 14, no. 8, pp. 785–789, 2015, doi: 10.1038/nmat4327.
- [73] X. Guo et al., "Designing Mechanical Metamaterials with Kirigami-Inspired, Hierarchical Constructions for Giant Positive and Negative Thermal Expansion," *Advanced Materials*, vol. 33, no. 3, p. 2004919, 2021, doi: 10.1002/adma.202004919.
- [74] L. Jing et al., "Kirigami metamaterials for reconfigurable toroidal circular dichroism," *NPG Asia Mater*, vol. 10, no. 9, pp. 888–898, 2018, doi: 10.1038/s41427-018-0082-x.
- [75] Y. Niu et al., "The new generation of soft and wearable electronics for health monitoring in varying environment: From normal to extreme conditions," *Materials Today*, vol. 41, pp. 219–242, 2020, doi: 10.1016/j.mattod.2020.10.004.
- [76] M. Amjadi, K. U. Kyung, I. Park, and M. Sitti, "Stretchable, Skin-Mountable, and Wearable Strain Sensors and Their Potential Applications: A Review," *Adv Funct Mater*, vol. 26, no. 11, pp. 1678–1698, 2016, doi: 10.1002/adfm.201504755.
- [77] B. Younes, "Smart E-textiles: A review of their aspects and applications," *Journal of Industrial Textiles*, vol. 53, p. 15280837231215492, 2023, doi: 10.1177/15280837231215493.

[78] S. Park and S. Jayaraman, "Smart textiles: Wearable electronic systems," *MRS Bull*, vol. 28, no. 8, pp. 585–591, 2003, doi: 10.1557/mrs2003.170.

[79] Y. Morikawa, S. Yamagiwa, H. Sawahata, R. Numano, K. Koida, and T. Kawano, "Donut-Shaped Stretchable Kirigami: Enabling Electronics to Integrate with the Deformable Muscle," *Adv Healthc Mater*, vol. 8, no. 23, p. 1900939, 2019, doi: 10.1002/adhm.201900939.

[80] M. Jo et al., "3D Printer-Based Encapsulated Origami Electronics for Extreme System Stretchability and High Areal Coverage," *ACS Nano*, vol. 13, no. 11, pp. 12500–12510, 2019, doi: 10.1021/acsnano.9b02362.