تطوير التعليم الطبي عبر أجهزة الاستشعار البيولوجي

Employing smart biosensors in medical education

ا.د/ خـــالـــد فـــرجـــون
أســـــتاذ تكنولوجيا التعليم بكلية التربية
جامعة حلوان

المجلة العلمية المحكمة للجمعية المصرية للكمبيوتر التعليمي
معرف البحث الرقمي DOI: 10.21608/EAEC.2022.119852.1067
المجلد العاشر - العدد الأول – مسلسل العدد (19) - يونيو 2022
رقم الإيداع بدار الكتب 24388 لسنة 2019
ISSN-Online: 2682-2601 ISSN-Print: 2682-2598
موقع المجلة عبر بنك المعرفة المصري http://eaec.journals.ekb.eg
العنوان البريدي: ص.ب 60 الأمين وروس 42311 بورسعيد – مصر

تاريخ الإرسال	2022-02-03 01:01:14
تاريخ القبول	2022-02-03 01:02:36
عرض المقال المنشور	المجلد 10، العدد 1 ، مسلسل العدد 19 https://eaec.journals.ekb.eg/article_216920.html

CC BY NC ND

تطوير التعليم الطبي عبر أجهزة الاستشعار البيولوجي

Employing smart biosensors in medical education

ا.د/ خـــالـــد فـــرجـــون

أســـــتاذ تكنولوجيا التعليم بكلية التربية – جامعة حلوان

مـقـدمـة:

قفز التعلم الطبي في الآونة الأخيرة قفزة هائلة بعد توظيف اجهزة الاستشعار الذكية القابلة للارتداء، وأصبح توظيف هذه الأجهزة خيارًا شائعًا للمراقبة المستمرة للعديد من الحالات المرضية، وقد ثبت بالفعل الفائدة العالية لدقة نتائجها لا سيما في حالة ذوي الاعاقة أو كبار السن، خاصة لما توفره من سرعة في نقل النتائج لحظة الاستجابة، بجانب سهولة تثبيتها على الذراع أو الساق أو العضو قيد المتابعة.

من هذا المنطلق اهتمت تكنولوجيا التعليم بالسعي بتوظيف هذه التكنولوجيا الجديدة في مجالات التعليم العام، وبالتحديد في مجال التعليم الطبي كإحدى التخصصات الهامة التي تسعى تكنولوجيا التعليم لتطويرها في الآونة الحالية، لا لاحتياجنا في توظيفيها في ظل جائحة Covid 19 فحسب، بل لضرورة الإخذ بأفضل النظم الحديثة في مجال التعليم الطبي، الذي يعد من أهم المجالات التعليمية لاهتمامه بالإنسان.

وتعد أجهزة الاستشعار البيولوجية الذكية من أكثر المصادر دقة في نقل البيانات في النظام بأكمله، ولذا فإن نشر ثقافة التدريب الالكتروني لطلاب كليات الطب قبل تخرجهم واثناء ممارستهم في الحقل الطبي لحصولهم على أدق النتائج والبيانات التي يصعب الحصول عليها من خلال أدوات جمع البيانات التقليدية، يعد متطلب ضروري لنجاح التعليم الطبي عند تطويره. رغبة ايضاً في اقتران التعليم الطبي بالتدريب الفعال والمشوق، والسعي لميلاد طبيب معلم جديد قادر على بناء بيئة تعليمية حقيقية والكترونية، تعتمد على توفر بيانات دقيقة وفق تحليلات التعلم للطلاب المستخدمين لهذه البيئة المدمجة أو ربما المرضى المعتمد عليهم عند تدريب الطلاب لتشخيص الامراض، واللذين يترددون على هذه البيئات التعليمية، كما جاءت هذه الورقة ايضاً لنشر ثقافة توظيف هذه التكنولوجيا للإخذ بها في مجالات التعليم المختلفة في الآونة القادمة، كالتعليم الرياضي ومتابعة الجوانب النفسية وعلاقتها بالجوانب الفسيولوجية للمترددين على البيئات الالكترونية الذكية، حتى يتسنى للمصممين التعليمية والمعلمين من تهيئة البيئة الالكترونية للتكيف بمفهومه الحديث.

مرة أخرى فهذا التوظيف لهذه التكنولوجيا لا يأتي رغبة في تزيين التعليم الطبي بإحدى المستحدثات ، بل لحتمية الاخذ بتحليلات التعلم ذات الصلة بالمستخدم لهذه البيئات التعليمي، وأيضا للخروج من بوتقة الطرق والأساليب التقليدية غير المجدية التي تعتمد فيها جمع البيانات وفق تسجيلات الفئة المساعدة أو حتى المرافقين مع المريض في منازلهم، كاستطلاع الآراء او المقابلات الشخصية، والذي اصبح متاح بعد انشار المستحدثات المتمثلة في أنظمة الذكاء الاصطناعي لنقل كافة المعلومات عن المريض لحظة بلحظة بحيث يسهل على الطبيب المعالج متابعة المريض عن

بعد، أو ربما المعلم لمتابعة طلابه، بل ويوصي في ضوء هذه البيانات باختيار أنسب سبل العلاج المناسبة عند تهيئة البيئة، دون الحاجة لنقل المريض للمستشفى أو نقل الطبيب الى محل إقامة المريض.

ولذا كانت هناك حاجة لإعادة تصميم البيئات التعليمية الطبية بطرق جديدة تتكامل فيها البيئات الحقيقية مع البيئات الالكترونية فتحقق المفهوم الشامل للبيئات المدمجة القائمة على النظم الذكية، بحيث يمكن لطالب كليات الطب وربما الطبيب بعد التخرج من التعرف على هذه الأنظمة وتتوفر له السبل التعامل معها، بحيث يصبح متهيء لسوق العمل العالمي، لا المحلي فحسب.

كما تأتي رغبة الباحث ايضاً من تناول هذه التكنولوجيا الجديدة لعدم دقة البيانات المجمعة من خلال أدوات جمع البيانات كالاستبيانات والمقابلات أو التسجيلات اليدوية التي يحصل عليها الطبيب من خلال الممرضات أو من خلال توجيه الأسئلة للمرضي ، وهذا ما أكد عليه إحدى عشر طبيب في مجالات الرمد والجراحة العامة والباطنة في مستشفى طب قصر العيني بجامعة القاهرة في مايو من العام الحالي 2021 ، حيث اجمعوا في مقابلات غير مقننة، أنه رغم عدم دقة المعلومات والبيانات بالطرق التقليدية، إلا أنها المتوفرة في ضوء الإمكانات الحالية، ومع ذلك فقد ابدوا رغبتهم في ادخال الأنظمة الحديثة كنظم للاستشعار ، حتى يتدربوا على استخدامهم وينشرون ثقافة استخدامها بين الطلاب والعاملين في المجال الطبي.

وتأكيدا لحاجة التعليم الطبي لهذه التقنية، فقد أشار الأطباء اللذين اجرى عليهم الدراسة الاستكشافية، أن رغم ما استحدثته الجامعات من طرق حديثة في مجال التعليم الطبي ورغم ما ظهر في كثير من الأساليب والطرق الحديثة في المناهج وطرق التدريس والتقييم لديهم، ورغم ما نادت به اراء المتخصصين بضرورة الاهتمام بمخرجات التعليم Outcome- based بدلا من التركيز على عملية التعليم فحسبProcess-based ، ورغم الاهتمام بتدريس وتقييم الكفاءات Competencies مثل الكفاءات المهنية ومهارات التواصل والقيادية بالإضافة إلى المعلومات الطبية والمهارات السريرية. وأيضا رغم الاهتمام بطرق التدريس كاستخدام حلقات النقاش وتدريس المجموعات الصغيرة بدلا من المحاضرات التقليدية، إلا أن فاعلية هذه الأساليب والطرق التدريسية ما زالت مقيده بكم المعلومات ونوعيتها ودقتهما عن المتلقي، سواء كان هذا المتلقي هو الطالب الطبيب أو حتى العينة المستخدمة من المرضى حتى يسهل على مقدم الخدمة تجهيز المعلومات اللازمة لمتلقي الرسالة التعليمية، وهذا لا يمكن أن يتحقق دون الرجوع لطرق وأساليب مقننة لجمع هذه البيانات، وفي أوقات زمنية محددة وممثلة لواقع الحالة المرضية لمتلقي الخدمة الطبية.

وأخيرا في ظل توظيف انترنت الاشياء Internet of things وبزوغ الثورة الصناعية الرابعة في مناحي الحياة المختلفة، خاصة بعد انتشار مسميات "المنزل الذكي" و"المدينة الذكية" وكذلك "المستشفى الذكية"، كانت هناك ضرورة للتكامل بين التعليم الطبي من جهة وتكنولوجيا التعليم معتمداً في ذلك على الاخذ بأنظمة الاستشعار البيولوجية القابلة للارتداء، والتي يمكن أن تقيس عدد كبير من العلامات المتوفرة على جسم الانسان، والتي ستكون طريق جديد في الاعداد للتعليم الطبي بل ربما قريباً في التعليم الجراحي Surgical Education بصفة خاصة.

أجهزة الاستشعار القابلة للأرداء:

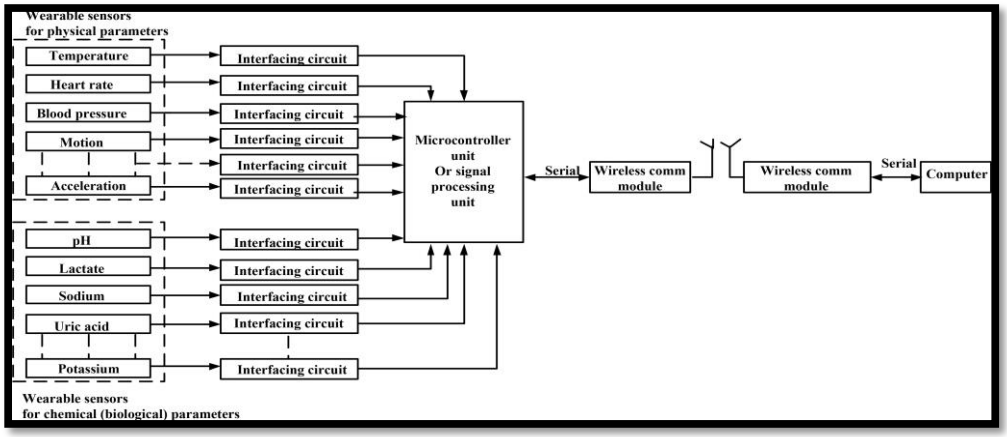
تلعب هذه الاجهزة دورًا مهمًا في مراقبة العلامات البيولوجية المستخدمة في تشخيص ردود فعل الانسان السوي أو المريض، حيث توفر إمكانات هائلة في اكتشاف مجموعة واسعة من هذه العلامات التي يجب مراقبتها بانتظام لتحديد حالة الشخص اثناء ارتدائه لها.

ولذا يعد دور متابع حالة المريض أو المتعلم في المجال الطبي؛ هو توفير أكبر عدد ممكن من المحفزات التي تساعد على تقوية الجانب الايجابي لهذا المستخدم لتحفيزه على الاستمرار في هذه البيئة بشوق وايجابية، وهذا لا يمكن أن يحدث إلا من خلال خلق الطمأنينة لدى مستخدم هذه البيئات سواء كان متعلم / مريض متابع لحالته الصحية، وذلك لجمع أكبر قدر من المعلومات عنه، بحيث يوظفها المصمم لاتخاذ كافة الإجراءات الصحيحة لتكيف هذه البيئة لمتطلبات المستخدم، فتصبح بيئة تعلمية تكيفية حقيقية. وغالبًا ما يتعين عند اتخاذ هذه الاجراءات أن تكون العلامات الفسيولوجية للمستفيدين من الأطفال أو ذوي الاعاقة غير المعروفة، والتي يصعب عليهم ابداء شكواهم المرضية بسبب اعاقاتهم.

وهنا يصبح الأساس في إيجابية التفاعل بين المستفيد والبيئة هو أن يتيح مصمم البيئة، توظيف أجهزة الاستشعار القابلة للارتداء بربطها بالعلامات بالمتوفرة على جسم المريض، بحيث يمكن الاستناد عليها لقياس العديد من علامات القياس مثل ضغط الدم ومعدل النبض وغيرها لمراقبة الحالة المرضية.

ولا يقف حد نوعية أجهزة الاستشعار الملتصقة على الجلد بل تشتمل ايضاً على الاساور والساعات الذكية والنظارات وكذلك أجهزة متابعة كهرباء الدماغ مثل جهاز (BCI) Brien Computer Interface، مما يمَكن أن تغير هذه الأجهزة القابلة للارتداء في المستقبل بصورة كلية من البيئات التعليمية الحالية، فتعيد توظيف المصمم أو المعلم للبيئة التعليمية، بل وتقلل أيضًا من تكاليف المتابعة لفئات المستفيدين المتنوعة، وتزيد من تجهيز هذه البيئات لاحتياجاتهم بسهولة لتحقيق الأهداف التعليمية المرجوة.

كما يمكن الإفادة من هذه الاجهزة بمراقبة العلامات عن بعد عبر الانترنت للمتلقين المترددين على بيئة تعليمية الكترونية من خلال أجهزة الاستشعار القابلة للارتداء، على أن تكون مزودة بأجهزة إرسال متكاملة بين مصممي البيئات أو المعلمين في أماكن مختلفة على مستوى العالم والمستفيدين كالمرضى وغيرهم.



الشكل (1) مخطط لرصد العلامات الحيوية عن بُعد للإنسان من خلال أجهزة الاستشعار القابلة للارتداء، والتي يمكنها استخدامها لقياس مجموعة من العلامات الفيزيائية والبيولوجية للمستفيدين.

ولذا تعتبر أجهزة الاستشعار التي يمكن ارتداؤها من الانماط اللاسلكية المسئولة عن جمع البيانات الفسيولوجية والحركية، بهدف تمكين الطبيب من مراقبة حالة المريض عن بعد وإخطاره لاتخاذ قرار طبي مناسب في وقته، حيث يمكن متابعة التغييرات الصغيرة لحظة بلحظة، كما تتوفر في هذه الأجهزة إمكانية استبعاد الحساسات القابلة للارتداء المعتمدة على مستشعرات الرؤية، والتي قد تنتهك خصوصية أي شخص. علاوة على ما تتميز به بسرعة تسجيل الاستجابة مقارنةً بأنظمة القياس التقليدية، حيث يمكن للمريض إبلاغ القائم بالرعاية على الفور وطلب المساعدة في حالة الطوارئ، دون الحاجة للتواصل بطرق مساعدة كالتليفون أو غيره. كما تعد هذه الأنظمة من أكثر الانظمة إحكاما وأسهل في الاستخدام مقارنة بأنظمة طاولة العمل التي تتطلب من المريض زيارة مكان خاص لأغراض الفحص.

مبادئ عمل أجهزة الاستشعار القابلة للارتداء

تعتمد جميع أجهزة الاستشعار في البداية على استخدام تقنية المسح الضوئي المختلفة، مثل البصري والكهربائي، والكهربائي الانضغاطي والكهروكيميائي. وهناك فئتان مهمتان من أجهزة الاستشعار التي يمكن ارتداؤها لقياس المعلمات البيولوجية ومراقبتها هما (1) أجهزة الاستشعار الكهروكيميائية و (2) أجهزة استشعار المقاومة. ويتم استخدام هاتين الفئتين من أجهزة الاستشعار على نطاق واسع لقياس المعلمات المختلفة. يمكن تصنيف المستشعرات الكهروكيميائية أيضًا على أنها (1) موصلة، (2) لمقياس التيار و (3) لقياس الجهد.

تستخدم مستشعرات المقاومة، والتي تشتمل في الغالب على مناهج مقاومة وسعويه، على نطاق واسع لتصنيع أجهزة استشعار مختلفة. حيث يوفر المستشعر السعوي حساسية عالية، واعتمادًا منخفضًا على درجة الحرارة، ويتميز بصغر الحجم واستهلاكًا صغيرًا للطاقة، مع إمكانية استشعار أنواع كبيرة من المعلمات الفيزيائية والكيميائية. وقد تكون المستشعرات السعوية من أنواع مختلفة، مثل الألواح المتوازية، الأسطوانية المحورية المشتركة، المكثف الأسطواني المتقاطع والمجال

الهدبي. يمكن أيضًا استخدام مجال التهديب للمكثف لاستشعار قوة العينة وموقعها وملمسها والعديد من المعلمات الفيزيوكيميائية.

وتتميز أجهزة الاستشعار السعوية بانها مناسبة أيضًا لقياس المعلمات غير الغازية، وقد تكون عينة قياس المعلمات في شكل غازي أو سائل. وعموما تلعب المستشعرات الكهروكيميائية دورًا مهيمنًا في قياس المعلمات الفيزيوكيميائية نظرًا لحساسيتها العالية وقابليتها للنقل وبساطتها في البناء والتكلفة المنخفضة. وتستخدم معظم هذه المستشعرات عينات الدم، وبالتالي فهي غازية بطبيعتها. ولذا فقد تم تطوير العديد من أجهزة الاستشعار الفيزيائية القابلة للارتداء لمراقبة مستويات اللياقة البدنية الحيوية، وذلك من خلال عدد قليل جدًا من أجهزة الاستشعار الكهروكيميائية غير الغازية التي تستخدم سوائل الجسم، مع توفر عدد قليل جدًا من التطبيقات التجارية.

خصائص أجهزة الاستشعار القابلة للارتداء

عندما يعمل جهاز الاستشعار في بعض البيئات التعليمية لاكتشاف علامات معينة، قد يواجه ثلاثة مدخلات مختلفة: المدخلات المستهدفة، والمدخلات المتداخلة، وتعديل المدخلات.

المدخلات المستهدفة هي العلامة التي يراد قياسها بواسطة جهاز الاستشعار. بينما تشير المدخلات المتداخلة إلى تلك المدخلات التي تكون أجهزة الاستشعار حساسة لها عن غير قصد. بينما يقصد بالمدخلات المعدلة بتلك المدخلات التي تسبب تغييرًا في علاقة المدخلات والمخرجات للمستشعر بالهدف والمدخلات المتداخلة. على سبيل المثال، في مقياس حرارة يستخدم لقياس درجة حرارة الجسم، يتسبب التغيير في درجة الحرارة في حدوث تغيير في مقاومة جهاز الاستشعار، والذي يتم تحويله أخيرًا إلى إشارة كهربائية. درجة حرارة الجسم هي المدخلات المطلوبة. أحد المدخلات المتداخلة التي غالبًا ما تسبب خطأ في القياس هو المجال الكهرومغناطيسي 50 هرتز الذي ينتجه الجهاز الكهربائي في البيئة المحيطة مما يتسبب في جهد مستحث غير مرغوب فيه في الدائرة. قد يعمل تأثير التسخين الذاتي للترمستور وتقلب جهد الإثارة كمدخلات معدلة. كلاهما يغير العلاقة الفعلية بين المدخلات والمخرجات لجهاز الاستشعار.

وتنقسم خصائص العلامات بشكل عام إلى فئتين: الخصائص الثابتة والخصائص الديناميكية. و هناك العديد من العلامات الفسيولوجية التي تكاد تكون ثابتة أو تتغير ببطء شديد، فمثلا تظل درجة حرارة جسم الإنسان ثابتة تقريبًا باستثناء الزيادة في حالة الحمى. ولذا فخصائص أداء جهاز الاستشعار لمثل هذه المدخلات هي الخصائص الثابتة. ومن الخصائص الثابتة المهمة: الحساسية، والامتداد، والدقة، والعتبة، والتباطؤ، والانحراف قصير الأجل وطويل الأجل، ووقت الاستجابة، ووقت الاسترداد، والحساسية المتصالبة، ونسبة العائد، وإمكانية التبادل.

ومع ذلك، هناك العديد من العلامات التي تختلف بسرعة وهي ما تسمى بالخصائص الديناميكية، وقد تمت دراسة الخصائص الديناميكية للأداة باستخدام بعض إشارات الإدخال القياسية مثل المدخلات المتدرجة والمنحدرة والقطع المكافئ والجيوب.

أنواع العلامات الحيوية:

صنفت العلامات الحيوية على الجسم مع / بدون ميزات الاتصال اللاسلكي إلى فئتين: العلامات الفيزيائية (الصلبة) والعلامات البيولوجية(المرنة). إذ يمكن كلاهما أن يستخدم في تهيئة الأطراف الصناعية الطبية، والجلد الاصطناعي، والروبوتات اللينة، والعلاج، وتوصيل الأدوية، عبر الانترنت لمراقبة العلامات الصحية على اجسام المرضى.

وفيما يتعلق بالقياسات أو المعلمات الفيزيائية فهي علامات القياس المرتبطة بالحركة، والإجهاد، والاهتزاز، ودرجة الحرارة، ومعدل التسارع، ومعدل ضربات القلب، والأمراض العصبية أو أمراض القلب والأوعية الدموية مثل النوبات أو ارتفاع ضغط الدم، إلخ. كما توفر هذه القياسات؛ قياسات فرعية أخرى كدرجة الحرارة على جلد الإنسان حيث تحمل الكثير من المعلومات والقياسات الفرعية الأخرى ذات الصلة بالظروف الصحية مثل السكتة الدماغية والنوبات القلبية وأمراض الرئة الصدمية والالتهابات، إلخ. وتتأثر حركة الإنسان بالعديد من العوامل، بما في ذلك الآثار الفيسيولوجية والتشريحية والنفسية والبيئية والاجتماعية. كما يمكن أن تحمل الحركة العديد من المقاييس الصحية الفرعية ذات الصلة بالنوبات القلبية وهشاشة العظام والشيخوخة وبعض أمراض المناعة الذاتية.

ورغم ما تتميز به هذه الاجهزة، إلا أن هناك بعض العيوب منها ارتفاع تكلفة الإنتاج، تكلفة المواد الخام المستخدمة في التصنيع، وكذلك استخدام الطاقة العالية للنوعية الصلبة منها (على سبيل المثال، مستشعرات السيليكون) مقارنة بأجهزة الاستشعار المطورة باستخدام الركائز المرنة حتى لا يتسبب في إهدار الطاقة على المدى الطويل، بجانب عدم راحة المريض عند ارتداء الأنظمة الصلبة بسبب الطبيعة غير المرنة والهشة لها، خاصة أثناء الحركات العضلية، بالإضافة الى كبر حجمها بالمقارنة بالمرنة، وأخيرا ارتفاع مخاطر الإصابة الحرارية الناجمة عن الطبيعة غير العضوية للأقطاب الكهربائية وركائز أجهزة الاستشعار الصلبة.

من هذا المنطلق يتأكد أن الخطوات السريعة في تطوير أنظمة الاستشعار الصلبة أقل من النوعية المرنة، وبالتالي، أصبح اكتساب أجهزة الاستشعار المرنة / البيولوجية القابلة للارتداء شعبية في التطبيقات التجارية، إلا انه ظهرت في الآونة الأخيرة منتجات دمجت مزايا أجهزة الاستشعار المرنة والصلبة معا، بحيث تصبح اجهزة أرق وأدق وتتمتع بمرونة عالية وقابلية للانحناء، مما قلل من الأثار السلبية الواضحة في نظيراتها الجامدة أو المرنة في بعض سعاتها التخزينية، وكذلك بهدف زيادة مقاومة تأثيرها، مع السعي للتكلفة المنخفضة.

كما صنفت أجهزة الاستشعار لاكتشاف العلامات البيولوجية الى نوعين: أجهزة الاستشعار الغازية وغير الغازية. حيث يقصد بأجهزة الاستشعار الغازية؛ تلك أجهزة الاستشعار (التي تسمى أحيانًا أجهزة الاستشعار المتطفلة) التي تعتمد في قياسها على سوائل الجسم التي يتم الحصول عليها عن طريق اختراق الجسم من خلال الحقن أو الشق. كما يقصد بأجهزة الاستشعار غير الغازية القابلة للارتداء؛ هي التي لا تتطلب سوائل جسم الإنسان عن طريق اختراق الجسم بالحقن أو الشق، لذلك فهي أكثر جاذبية وأقل إيلامًا للمستخدم. وقد تكون سوائل الجسم التي تستخدمها أجهزة الاستشعار غير الغازية المرتبطة بقياس سائل اللعاب أو العرق أو الدموع أو سوائل المتخللة من الجلد، وهي

غالبا ما سيلجأ اليها المتخصصون في تكنولوجيا التعليم لتوظيفها لاستخلاص البيانات من المتعلمين لتهيئة البيئات التكيفية لتحقيق الأهداف التعليمية المرجوة.

ولذا فأقرب الأجهزة استخداما في العملية التعليمية هي التي تجمع بين الأجهزة المرنة او ما تسمى بالأجهزة المزدوجة، والتي تظهر امكانيتها التحليلية في الجمع بين المكون البيولوجي مع الكاشف الفيزيائي الكيميائي، فتوفر سعتها الجمع بين الأنسجة، والكائنات الحية الدقيقة، ومستقبلات الخلايا، والإنزيمات، والأجسام المضادة، والأحماض النووية، وما إلى ذلك، ومع ذلك فقد جاءت اغلب البحوث تؤكد على الأهمية الأعلى لأجهزة الاستشعار البيولوجي في مجال التعليم الطبية والعاج بصفة عامة.

ويعد اللعاب من السوائل المركبة التي تحمل العديد من المعلومات المتصلة بالعناصر الكيميائية التي تتخلل الدم، حيث يمكن أن يركب جهاز الاستشعار للعاب على الأسنان دون أي اضرار أو ازعاج. ويستعمل هذا السائل بكثرة في مراقبة الانسان عبر الإنترنت لدراسة حالته المزاجية، ولذا يعد هذا السائل خير معبر عن حالة المتعلمين العاطفية والمزاجية والهرمونية ، والتي تعد خير مؤشر للتحكم في تهيئة هذه البيئات الالكترونية للتكيف مع المتعلمين، ومن ثم لمعرفة مدى اقبالهم ومدى ملائمة المصادر المعرفية داخلها لرغباتهم واستعداداتهم، كما يمكن من خلالها دراسة الحالة العاطفية للتحكم في المحتوى التعليمي المطلوب داخل هذه البيئات التعليمية، والتجهيز لاختيار أنسب المصادر التعليمية، حيث يظهر سائل اللعاب كثير من المعلومات التي قد تدل مصمم هذه البيئات التعليمية على اختيار أنسب المصادر التعليمية .

كما تمثل الدموع باعتبارها سائل بيولوجي مهم آخر لهذه المستشعرات، دورا هاما لما تحتويه بداخلها على سائل معقد خارج الخلية يحتوي على بروتينات / ببتيدات ، دهون، إلكتروليتات ومستقبلات عبر الغدد الدمعية وسطح العين والخلايا الظهارية وغدد الميبوميان والخلايا الكأسية والدم. مما يتيح العديد من العلامات الفسيولوجية المتاحة عبر الأحماض الأمينية ومضادات الأكسدة والمستقبلات، حيث يمكن قياس هذه العلامات من خلال وضع مستشعرات صغيرة الحجم ومرنة ورقيقة يمكن ارتداؤها على شبكية العين وغالبا ما تستخدم الدموع في متابعة المريض لدراسة معدل الدهون، كما تستخدم في متابعة حالة المتعلم داخل البيئات التعلمية التكيفية لمعرفة مدى اقباله عاطفيا على عناصر البيئة التعليمية الذكية.

والعـــرق هو سائل الجسم البيولوجي الثالث المهم؛ إذ يحتوى هذا السائل على العديد من الأنواع الكيميائية المهمة لمراقبة حالة المستخدم لهذه البيئة، وذلك من خلال مستشعرات غير جراحية وغير مؤلمة، حيث يمكن قياس معدل لاكتات الصوديوم ، والأمونيوم ، والكالسيوم ، وهشاشة العظام ، وفقدان معادن العظام ، وتليف الجلد ، ومستوى الكحول ، ومستويات الإجهاد البدني والتي تستخدم بكثرة في مجال التعليم الرياضي والتدريبات البدنية ، وما إلى ذلك.

وهناك نوعان من أجهزة الاستشعار لرصد العلامات الفسيولوجية باستخدام العرق: هما القماش المرن المصنوع من البلاستيك أو النسيج الذي يلصق على الجلد، حيث يستخدم لجمع عينات العرق من خلال تيارًا كهربائيًا ذا قيمة محددة بعناية، فيثير من خلالها مادة كيميائية محفزة في الجلد، يمكن من خلالها إعطاء قياسات يسترشد من خلالها للحصول على بيانات عن خصائص المستخدم.

ويأتي السائل المتخلل كرابع سائل هام من خلال الجلد يمكن استخدامه لاستخراج العوامل الفيزوكيميائية المهمة. وهو يتكون من مذيب مائي يحتوي على السكريات والأملاح والأحماض الدهنية والأحماض الأمينية والإنزيمات المساعدة والهرمونات والناقلات العصبية وخلايا الدم البيضاء وفضلات الخلايا. يمكن استخدام هذا السائل للكشف عن مستويات السكر، وفشل الأعضاء، وفعالية الدواء، والأملاح، كما يستخدم في مجال التدريبات الرياضة، وما زال محل تجريب لتوظيفه في التعامل مع البيئات التعليمية التكيفية.

تصنيع أجهزة الاستشعار البيولوجية:

تنقسم مراحل تصنيع جهاز الاستشعار البيولوجية إلى ثلاثة مراحل، حيث يوضح الشكل (2) **المرحلة الأولى** حيث تمثل تجهز المواد الخام من البوليمرات والجسيمات النانوية المستخدمة لتطوير الركائز والأقطاب الكهربائية. حيث يتم معالجة هذه المواد الخام في **المرحلة الثانية** بتقنيات تصنيع مختلفة من أجل الانتقال **للمرحلة الثالثة** الخاصة بتشكيل نماذج أولية للمستشعرات والتي تتميز بدائرة تكييف الإشارة وتضمنها لتشكيل أجهزة الاستشعار. لاستخدامها مع **التطبيقات المتنوعة**، وفيما يلي تفسير لذلك.

الشكل (2) خطوات تصنيع أجهزة الاستشعار المرنة.

المرحلة الاولى: **اختيار** المواد والتقنيات

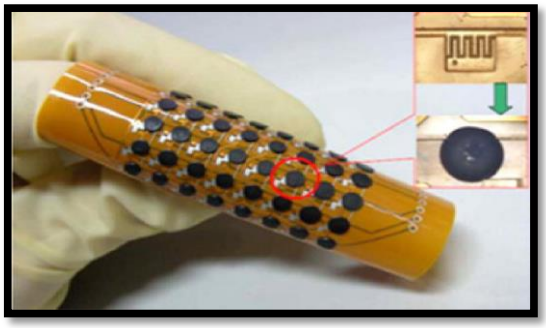
يعتبر اختيار المواد والتقنيات المستخدمة لتصنيع أجهزة الاستشعار المرنة القابلة للارتداء المرتبطة بها، من المراحل الهامة لما تتمتع به هذه المرحلة من توفير مختلف البوليمرات والمواد الموصلة المستخدمة، والتي تعد ضرورة عند إعداد الركائز والاقطاب الكهربائية لأجهزة الاستشعار.

ولذا تعتمد التقنيات المختلفة المستخدمة في تصنيع نماذج الاستشعار الأولية بشكل أساسي على التطبيق المستخدم لنظام الاستشعار. كما تعتمد مواد المعلمات وتقنياتها على بنية أجهزة الاستشعار، والتي تساعد على توصيف المتغيرات التي تحدث داخل السياق المحدد للقياس.

وتستخدم أنواع مختلفة من المواد المرنة، والتي تختلف وفق معامل يونغ (E) للتوصيل الكهربائي والخصائص الميكانيكية لتطوير الركائز والأقطاب الكهربائية، حيث يتم معالجة هذه المواد بعدد من الخطوات لتطوير نماذج الاستشعار النهائية. وتعتمد الخطوات المطلوبة لمعالجة المواد على العملية المستخدمة في التصنيع والأبعاد النهائية لنموذج جهاز الاستشعار. فعلى سبيل المثال، يمكن تطوير الهياكل ذات الأبعاد بالميكرونات باستخدام تقنية الطباعة الحجرية الضوئية بدلاً من طباعة الشاشة الحريرية للهياكل المكررة. كما يأتي بعد تصنيع النماذج الأولية، مراقبة المعلمات المختلفة، مثل الجزء المقاوم والسعوي، والجهد، وما إلى ذلك. كما تعتمد المعلمات المختارة بشكل أساسي على نوع هيكل الأقطاب الكهربائية. ولذا يمكن تصنيف بنية جهاز الاستشعار على نطاق واسع إلى فئتين: الركائز والاقطاب الكهربائية، حيث تُعرف الركائز بأنها قاعدة جهاز الاستشعار التي تم تصميم الأقطاب الكهربائية فوقها لغرض الاستشعار. وقد تم تصميم هذه الاجهزة من ببوليمرات تتميز بالمرونة العالية والعزل الثابت، مما يجعلها مفيدة ودقيقة في القياس، علاوة على إنها أقل تكلفة مقارنة بالركائز الأخرى.

ولذا تعد البوليمرات عبارة عن جزيئات كبيرة تتشكل عن طريق الترابط التساهمي المتكرر، ويمكن تقسيم البوليمرات إلى نوعين مختلفين سواء بشكل طبيعي أو صناعي (تلك التي تم تطويرها في المختبر). كما يمكن تمييز هذين النوعين إلى ثلاث فئات: البوليمرات العضوية وهي البوليمرات اللاصقة التي تحتوي على الكربون، حيث يمكن أن تكون متوفرة بشكل طبيعي أو من خلال المختبر. مثال: نفثالات البولي إيثيلين (PEN). والفئة الثانية هي البوليمرات غير العضوية. وهي خالية من الكربون. مثال: السيليكون. ثم الفئة الثالثة وهي البوليمرات الهجينة. وهي مزيج من الفئتين المذكورتين أعلاه، وقد تم تطويرها في المختبر. مثال: بولي دايميثيل سيلوكسان (PDMS).

ويمكن تصنيع الفئات الثلاث المذكورة بهياكل ومواد مختلفة. كما يمكن تقسيم التمايز بينهم بناءً على هيكلها وحدوثها إلى فئتين: فئة اللدائن العادية، وهي لها لزوجة ومرونة عالية مما يؤدي إلى معامل يونغ أقل مقارنة بأنواع أخرى من البوليمرات. مثال: المطاط، وفئة اللدائن الحرارية، ويتم تطويرها باستخدام البلاستيك الذي يتم تشكيله في البداية ثم يتم ترسيخه عند درجة حرارة محددة، وتكون القوى بين الجزيئات بين المونومرات أعلى مقارنة بتلك الموجودة في اللدائن، وبالتالي يكون لها وزن جزيئي أعلى. مثال: التفلون من أجل صنع الأقطاب الكهربائية.



الشكل (3) تطوير الترانزستورات ذات الأغشية الرقيقة باستخدام ركيزة PET.

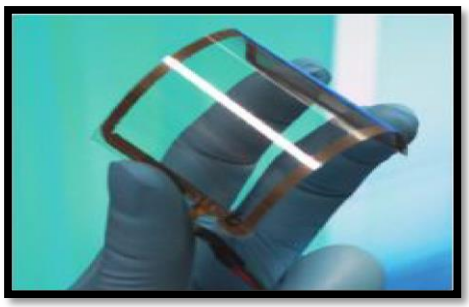
يوضح الشكل (3) مثالاً على مصفوفة مستشعر من فئة اللدائن الحرارية تم تطويرها باستخدام بوليمر عضوي، والجهاز عبارة عن ترانزستور محمل بغشاء رقيق (TFT) يستخدم PET كمواد ركيزة. ويلعب سمك ركائز جهاز الاستشعار دورًا مهمًا في تحديد تطبيق جهاز الاستشعار. ويستخدم لمراقبة المعلمات البيولوجية الخاصة مثلاً بتخطيط القلب، والتنفس، وحركة الأطراف، وما إلى ذلك، وتتميز هذه المستشعرات بصغر سماكتها نظرًا لحساسيتها العالية. كما يمكن تعديل سمكها وفق طبيعة التقنيات المستخدمة في التصنيع.

وفيما يتعلق بالأقطاب الكهربائية وهي الجزء الموصل من جهاز الاستشعار الذي يتفاعل مع المادة قيد الدراسة لتحديد خصائصها، فقد تم تطويرها في أجهزة الاستشعار البيولوجية من أنواع مختلفة من الجسيمات النانوية، حيث اعتمد حجم هذه الجسيمات النانوية على نوع المادة النانوية. ويمكن تصنيف الجسيمات النانوية إلى أنواع مختلفة، مثل الأنابيب النانوية، والأشرطة النانوية، والخلايا النانوية، والأسلاك النانوية، وما إلى ذلك. وتختلف هذه الأنواع من حيث مساحة سطحها، والخصائص الميكانيكية والحرارية، والتوصيل الكهربائي.

وقد تم في الفترة الحالية تطوير واستخدام الجسيمات النانوية من كل عنصر تقريبًا في صنع أجهزة الاستشعار. كما أن بعض العناصر الشائعة المستخدمة لتطوير مستشعرات مرنة هي الكربون والذهب والفضة والسيليكون والحديد والنيكل والكوبالت والنحاس. وهناك مزايا معينة لاستخدام الجسيمات النانوية مقارنة بالمواد المرنة الأخرى لتشكيل أقطاب جهاز الاستشعار. بعض هذه المزايا هي:

1. نسبة أبعاد أعلى، والتي تسمح باستخدام الجسيمات النانوية لتصميم الهياكل الدقيقة.
2. نسبة سطح إلى حجم أعلى، مما يجعلها خيارًا شائعًا لاستخدام تطبيقات العزل.
3. مرونة عالية وقابلية للانحناء، مما يجعل جهاز الاستشعار الكلي قابل للتمدد بشكل كبير.

ونظرًا للمزايا المذكورة أعلاه، تم تطوير الأقطاب الكهربائية في أجهزة الاستشعار البيولوجية بشكل أساسي بجسيمات نانوية مفردة أو في شكل مركب نانوي.



الشكل (4) ترانزستورات السيليكون المرنة باستخدام ركيزة سيليكون مرنة وأقطاب من الذهب.

وتعرف المركبات النانوية على أنها خليط من جسيمات نانوية مع بوليمر أو عناصر أخرى من أجل دمج خصائص المكونات الفردية. يوضح الشكل (4) مثالاً على قطب كهربائي مرن تم تطويره باستخدام الجرافين المركب و PET الذي يُظهر مرونة فائقة.

المرحلة الثانية: تقنيات التصنيع

بعد اختيار المواد الخام لجهاز استشعار معين، تتحدد هذه المرحلة في معالجة هذه المواد لإنتاج نماذج أولية للمستشعرات ذات شكل وبنية محددين. يتم اختيار نوع معين من تقنيات التصنيع بناءً على السمات التالية:

1. **المواد الخام.** تحدد أنواع المواد الخام المستخدمة لتطوير جهاز الاستشعار التقنية التي تتمتع بقدرة أفضل على معالجة المواد بأفضل كفاءة.

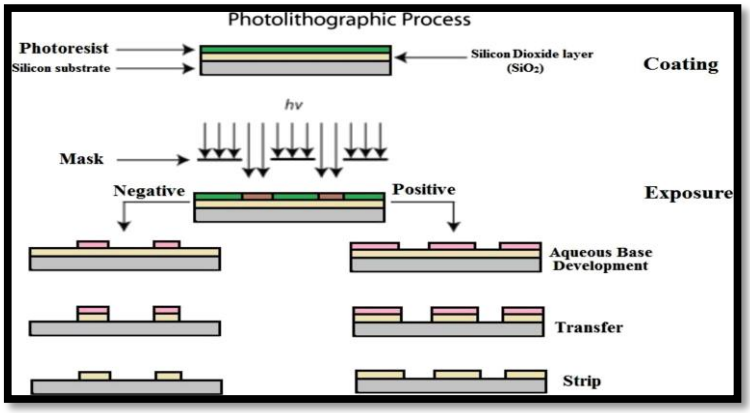
2. **أبعاد نماذج الاستشعار.** يمكن أن تختلف أبعاد النماذج الأولية للمستشعرات اختلافًا كبيرًا مع التقنيات المستخدمة في التصنيع. على سبيل المثال، في حالة طباعة الشاشة الحريرية، ستنخفض الأبعاد إلى بضعة ميكرومترات، بينما سيؤدي استخدام الليثوغرافيا الضوئية إلى خفض الأبعاد إلى بضع نانومترات.

3. **التطبيق.** يمكن أن يحدد الاستخدام المقصود للمستشعرات أيضًا التقنية التي سيتم اختيارها لتصنيعها. تتطلب بعض التطبيقات، مثل مراقبة حركات الجسم أو المعلمات الفسيولوجية، مستشعرات أصغر حجمًا وأكثر حساسية مقارنةً بالتطبيقات مثل استشعار الأحذية أو أنشطة الحياة اليومية، ومن بين تقنيات التصنيع المختلفة المتاحة والأكثر شيوعًا:

أولا: الليثوغرافيا الضوئية:

وهي الطباعة الحجرية أو الليثوغرافيا الضوئية هي أكثر التقنيات القياسية شيوعًا التي تم تطويرها من قبل أجهزة الاستشعار المرنة. ينقل الضوء التصميم المطور على قناع الصورة أو يتم تحميله على النظام. وهناك نوعان من عمليات الطباعة الليثوغرافية الضوئية بناءً على قالب هما الطباعة الليثوغرافيا المقنعة، وهي التي يكون فيها القناع أو القالب موجودًا فوق الركيزة المطلية بالمقاومة. حيث تسقط مصابيح الأشعة فوق البنفسجية على الركيزة عبر القالب، وبالتالي تشكل النمط المصمم على الركيزة، وكذلك الطباعة الليثوغرافية بدون قناع، حيث يتم تحميل التصميم المراد تشكيله بالمقاومة على النظام. حيث يقوم ضوء الأشعة فوق البنفسجية بمسح المقاومة على الركيزة لتشكيل التصميم المحمّل على المقاومة، ويمكن أن يكون مقاوم الضوء المطلي على الركيزة من نوعين مختلفين: مقاوم الضوء الإيجابي، حيث يتم مقاومة الضوء الموجب، ثم يتم إزالة الأجزاء المعرضة للأشعة فوق البنفسجية من الركيزة في العلاج اللاحق، بينما تبقى الأجزاء الأخرى، ثم تتم معالجة هذه المقاومة بعد ذلك من أجل نقش التصميم بشكل دائم على الركيزة، ويأتي النوع الثاني وهو المقاوم للضوء السلبي، حيث يبقى جزء المقاومة المكشوف مع ضوء الأشعة فوق البنفسجية على الركيزة بينما تتم إزالة الجزء الذي لم يتم لمسه.

يوضح الشكل (5) استخدام مقاومات الضوء الموجبة والسالبة في الطباعة الليثوغرافية الضوئية المقنعة. بعد عملية التعريض للضوء، ويتم إجراء التطوير والحفر على المقاومة. حيث يتحقق التطور بواسطة مواد كيميائية مختلفة، مثل هيدروكسيد رباعي ميثيل الأمونيوم (TMAH) ، اعتمادًا على من يقاوم التطور الكيميائي غير القابل للذوبان مع المقاومة ،

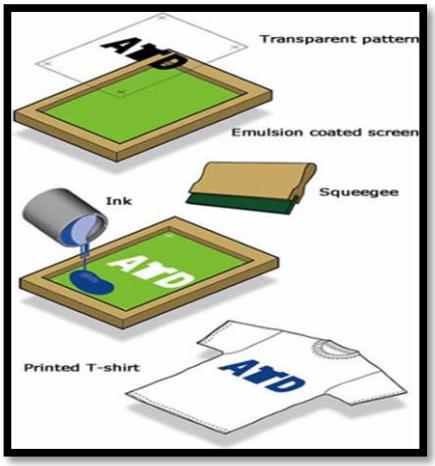


الشكل (5) رسم تخطيطي للطباعة الليثوغرافية الضوئية المقنعة باستخدام مقاومات الضوء الإيجابية والسلبية.

والذي يتم إزالته بواسطة عملية الحفر، ويمكن أن يكون الحفر من نوعين مختلفين: الحفر الرطب: حيث يتم معالجة الركيزة المكشوفة بالمواد الكيميائية من أجل إزالة المقاومة القابلة للذوبان. ويعتبر الحفر الرطب شائعًا جدًا في الأنظمة الكهروميكانيكية الدقيقة (MEMS) حيث يتم تطوير أنماط الخواص على الركيزة المكشوفة. ثم الحفر الجاف: (أو البلازما) وهو أكثر شيوعًا عند الحاجة إلى أنماط متباينة الخواص على الركيزة المكشوفة. ويتم إجراء الحفر الجاف بالأكسجين داخل غرفة تفريغ، حيث تضرب البلازما السطح العلوي لمقاوم الضوء من أجل التفاعل مع المقاومة المتطورة وإزالتها من الركيزة.

ثانيا: الطباعة الحريرية:

تم استخدام هذه التقنية منذ أوائل القرن التاسع عشر، عندما كانت تستخدم في الغالب للتطبيقات التجارية. إلا أن في العقدين الماضيين، أصبح استخدام هذه التقنية شائعًا في الحساسات الإلكترونية المرنة. خاصة في هذه التقنية، حيث تستخدم الشبكة الحريرية لنقل الأحبار من جانب إلى جانب آخر، باستثناء المناطق التي تسدها الشبكة. ويعد تدفق الحبر من الشبكة الموجودة على الركيزة أمرًا مهمًا، حيث يتحكم في سمك الركيزة. ويعد هذا التطور نمطًا مناسباً للطباعة على الركيزة من خلال الشبكة. يوضح الشكل (6) مثالاً لطباعة الشاشة الحريرية حيث يتم نقل التصميم المطور على الشاشة المطلية إلى القميص المطبوع مع خلال صب الحبر من خلال الشاشة الحريرية.



الشكل (6) رسم تخطيطي للخطوات المختلفة المتبعة في طباعة الشاشة الحريرية

هناك العديد من الأحبار الموصلة المتاحة تجاريًا، مثل الفضة والجرافين، والتي تُستخدم لتطوير الأقطاب الكهربائية عن طريق طباعة الشاشة الحريرية على الركيزة. وتعتبر أكبر ميزة لاستخدام هذه التقنية هي التنوع في نوع المواد التي يمكن استخدامها كركيزة للحبر. حيث يكون بعضها عبارة عن بوليمرات، وأقمشة، ولوحات دوائر كهربائية، وما إلى ذلك. على الرغم من استخدام هذه التقنية لفترة طويلة لتصنيع أجهزة مختلفة، إلا أنها ليست فعالة كالتقنيات الأخرى لتحقيق نتائج نهائية ذات دقيقة للغاية.

ثالثاً: الطباعة بالليزر:

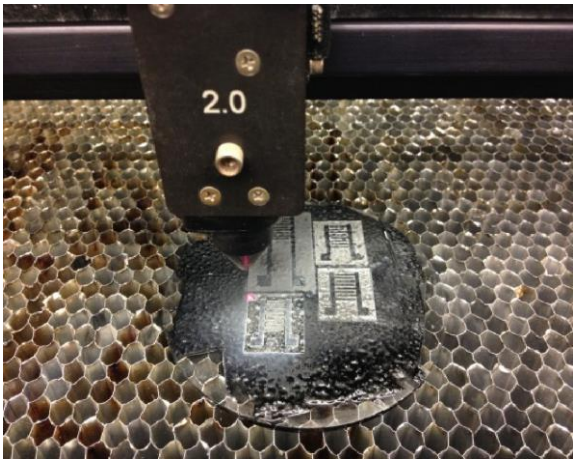
على الرغم من استخدام الليزر لفترة طويلة، لم يتم تقديم هذه التقنية إلا في العقدين الماضيين. وتعتبر هذه التقنية مفيدة مقارنة بالآخرين لعدة أسباب من أهمها انها لا يلزم وقت سابق لإعداد العينة. كما يمكن قطع المواد الرقيقة جدًا والمرنة باستخدام هذه التقنية، والتي لا يمكن تحقيقها باستخدام تقنيات مثل طباعة الشاشة الحريرية. كما أن المنتجات النهائية لها حواف ناعمة نسبيًا متعامدة على السطح. وبالتالي لا يلزم القيام بخطوة إضافية لتلميع المنتج النهائي.

كما أن في الطباعة بالليزر، يتم أخذ الركيزة تحت الليزر لمسح أو تقويس أجزاء من الركيزة لتشكيل التصميم. ولذا تعتمد نسبة العينة التي تمت إزالتها على المادة وإعدادات نظام الليزر المعين المستخدم لتلك العينة. وتتوفر أنواع مختلفة من آلات الليزر والتي تختلف وفقًا لطاقة الإخراج القصوى الناتجة عن فوهة الليزر. كما ان هناك سمة أخرى مهمة يمكن أن تتنوع بين سُمك العينة المنحنية وهي:

أ. **المحور z**. يحدد هذا المحور ارتفاع المنصة أسفل فوهة الليزر.

ب. **السرعة.** تتحدد هذه السرعة التي تتحرك بها الفوهة فوق العينة. ولذا في حالة الطباعة بالليزر، يجب أن يكون هناك مفاضلة بين طاقة الإدخال وسرعة الفوهة للحصول على الميزات المثلى لهذا النوع من الطباعة.

ج. **التكرر.** يحدد هذا التردد لفوهة الليزر التي تتحرك فوق العينة فتحدث التأثير.

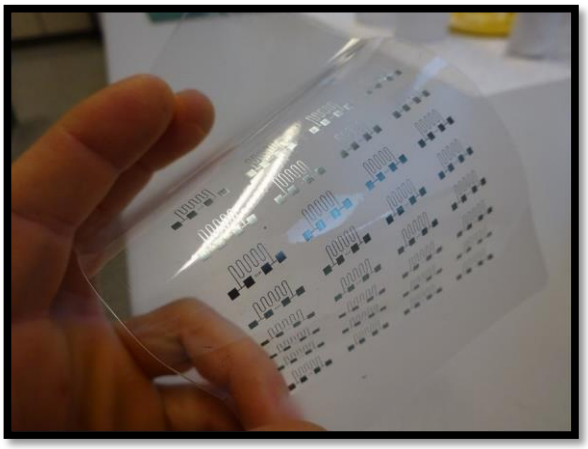


الشكل (7) يتم إجراء عملية الطباعة بالليزر على العينة لإنشاء نماذج أولية للمستشعرات

يوضح الشكل (7) مثالاً للطباعة بالليزر حيث يتم إنشاء نماذج أولية لأجهزة الاستشعار ذات الأشكال البينية من أنبوب نانوي كربوني (CNT) - ومركب نانوي قائم على PDMS. تم استخدام نظام ليزر عالمي بطاقة إدخال تبلغ 12 واط لهذه العملية.

رابعاً: الطباعة بالحبر النفاث:

تم تطوير تقنية الطباعة بالحبر النفاث للإلكترونيات المطبوعة من طابعات الليزر المستخدمة لطباعة المستندات. وقد تطورت فكرة استخدام الطابعات النافثة للحبر مع استبدال الحبر بأي حبر موصل لتطوير جزء الاستشعار على أي ركيزة استشعار. يوضح الشكل (8) مثالاً على مستشعر درجة الحرارة تم تطويره بواسطة الطباعة بنفث الحبر على ركيزة PET.



الشكل (8) يتم إجراء الطباعة بالحبر النفاث على ركيزة PET لتحفيز جهاز الاستشعار بدرجة الحرارة

وقد تعددت مزايا استخدام هذه التقنية في التصنيع مقارنة بالتقنيات الأخرى. البعض منهم أن أجهزة التصنيع أرخص، وتتكون أساسًا من طابعة مع استخدام أحبار موصلة مختلفة لغرض التصنيع، علاوة على أن الصور المنتجة عالية الجودة حيث يمكن أن يتم الوصول إلى أجهزة الاستشعار باستخدام هذه التقنية، كما أن الوقت اللازم لإكمال العملية قصير جدًا. مما مفيد بشكل خاص في حالة تصنيع الأجهزة واسعة النطاق، كما انها إنها أسهل في الاستخدام ويمكن تشغيلها من قبل أي شخص غير متخصص. ومن أكثر الأنواع الشائعة من الأحبار الموصلة المستخدمة في الطباعة بنفث الحبر هي الفضة والكربون والنحاس، وهناك نوعان من طابعات ضخ الحبر:

أ. **النوع المستمر:** حيث يتم ضخ وصلات التيار المستمر من الخزان الذي ينقسم إلى قطرات سائلة بواسطة الموجة الناتجة عن بلورة كهرضغطية داخل الليزر، ويتم شحن هذه القطرات بواسطة مجال إلكتروستاتيكي تم إنشاؤه بواسطة قطب شحن. ويتنوع الحقل وفقًا لتغير الشحنة المطلوبة لكل قطرة. ويتم تمرير هذه القطرات المشحونة عبر مجال إلكتروستاتيكي آخر يحرفها عن مادة الركيزة حيث تتم طباعتها. وتنقسم القطرات المشحونة في طريقها، بدءًا من انقسامها بواسطة الموجة إلى النقطة التي تخرج منها، على قطرات غير مشحونة أو حامية لتقليل التنافر بينها.

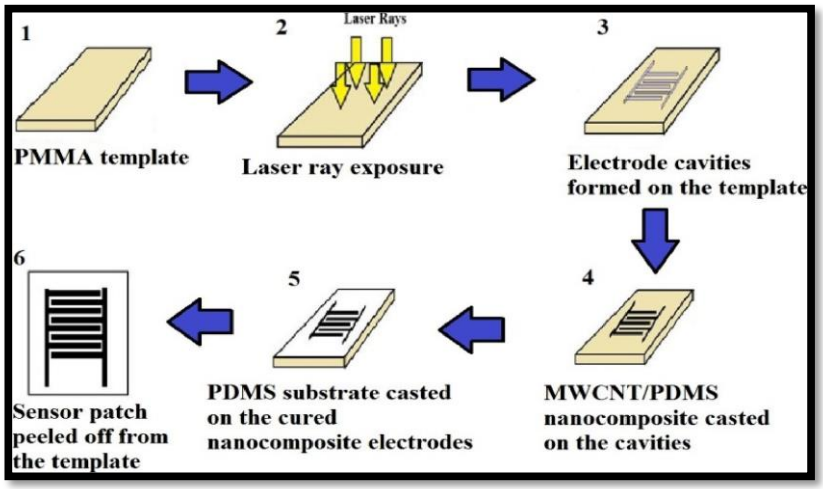
ب. **الاسقاط عند الطلب (DOD).** وتنقسم هذه التقنية أيضًا إلى فئتين:

- **الدفع الحراري**، تتكون الخراطيش من سلسلة من سخانات صغيرة يتم من خلالها تمرير نبضة تيار لتسخينها. يؤدي هذا بدوره إلى تسخين الحبر في الخزان، وبالتالي زيادة ضغطه وتشكيل فقاعة حبر. وتخرج هذه الفقاعة على الركيزة كقطرة، بحيث تؤدي الزيادة في ضغط الحبر وتسخينه وتكثيفه، جنبًا إلى جنب مع التوتر السطحي، إلى تأثير الرسم على الحبر من الخزان، مما يتسبب في حدوث سلسلة من القطرات على الركيزة.
- **الدفع الكهربائي الانضغاطي**. هذا مشابه للدفع الحراري DOD الحراري، باستثناء حقيقة أن السخانات الصغيرة يتم استبدالها بمواد كهرضغطية تغير شكلها عند استقبال الجهد. يؤدي هذا التغيير في الشكل إلى زيادة الضغط، ونتيجة لذلك يشكل الحبر من الخزان فقاعة ويضغط على القطرة.

خامساً: الصــب:

وهي تقنية تشبه طباعة الشاشة الحريرية، وقد استخدمت هذه التقنية أيضًا لسنوات عديدة للتطبيقات التجارية. ولم يتم استخدام هذه التقنية أيضًا في تصنيع مستشعرات مرنة حتى العقد الماضي أو نحو ذلك. ويتم تنفيذ هذه العملية باستخدام قالب يشكل قالبًا للشكل المطلوب. ثم تُسكب مادة سائلة أو شبه سائلة على القالب، ثم تتصلب على شكل ذلك القالب. وبعد تصلب المادة، يتم إخراجها من القالب واستخدامها كجهاز منفصل. وفي حالة أجهزة الاستشعار المرنة، تكون المادة السائلة أو شبه السائلة التي يتم سكبها هي الموصلة للمادة، التي تصلب وتشكل الأقطاب الكهربائية. في الجزء العلوي من القالب المتصلب، حيث يتم صب طبقة من مادة مختلفة، مثل البوليمر، لتصلبها وصبها لتشكيل الركيزة لجهاز الاستشعار. ويظهر الرسم التخطيطي للخطوات الموضحة هنا في الشكل (9) تم اتباع

هذه الطريقة من أجل تشكيل مستشعر مرن مع PDMS كركيزة ومركب نانوي من الأنابيب النانوية الكربونية متعددة الجدران (MWCNTs) و PDMS كمادة قطب كهربائي.



الشكل (9) رسم تخطيطي للخطوات الفردية المتبعة في تقنية الصب من أجل تطوير نموذج أولي لمجس حساس للضغط.

وقد تعددت مزايا استخدام هذه التقنية حيث يمكن تطوير الهياكل المعقدة بهذه العملية حيث سيكون تصميم الأقطاب الكهربائية المطلوبة هو تصميم القالب، كما إنها أرخص من تقنيات التصنيع القياسية الأخرى مثل الطباعة الحجرية أو الطباعة بالليزر، كما يمكن الحصول على نماذج أولية من أي شكل بهذه الطريقة.

وعلى الرغم من استخدام تقنية الصب على نطاق واسع في السنوات الأخيرة، إلا أن هناك بعض القيود التي تحد من استخدامها على نطاق واسع، من هذه القيود حيث لا يمكن الحصول على الهياكل الدقيقة بهذه التقنية، كما ان حساسية الأقطاب الكهربائية ليست عالية مثل تلك الخاصة بالأقطاب المطورة بتقنيات الطباعة أو القطع بالليزر. وذلك لأن المادة الثانية (يفضل أن يكون البوليمر) التي يتم سكبها فوق المادة الأولى المتصلبة تقلل من موصلية الأقطاب الكهربائية.

سادساً: النســـيـج :

بالمقارنة مع التقنيات المذكورة أعلاه، فإن النسيج هو طريقة حديثة نسبيًا لتطوير الإلكترونيات المرنة. وقد تم استخدام هذه التقنية بشكل أساسي لتطوير مستشعرات مدمجة في النسيج، حيث تتم هذه العملية على أنوال يدوية أو أي جهاز للنسج. ونظرًا لأن هذه التقنية جديدة نسبيًا، فإن آلات النسيج المصممة لتطوير مستشعرات مرنة من القماش لا تزال مرتفعة التكلفة وتحتاج إلى التعامل معها من قبل المتخصصين. يوضح الشكل (10) مثالاً على تقنية النسيج حيث تم استخدام خطوط الحرير المنسوجة كمستشعرات لقياس الجلوكوز.

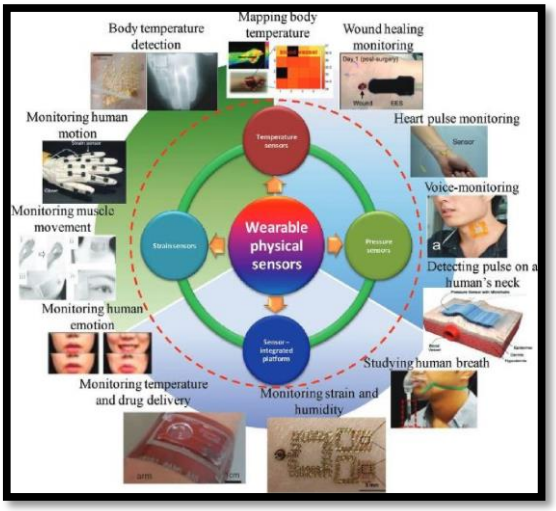
الشكل (10) نول يدوي يستخدم لنسج شرائط الحرير، والتي كانت تستخدم كمستشعرات الجلوكوز

وقد تعددت مزايا استخدام هذه التقنية حيث لن يضطر الشخص الذي يستخدم جهاز الاستشعار إلى ارتداء أي شيء بشكل منفصل لأن جهاز الاستشعار سيكون مدمجًا في النسيج. كما يمكن تصنيع جهاز الاستشعار بخطوة واحدة. لا توجد خطوات فردية لتطوير الأقطاب الكهربائية والركائز بشكل منفصل، كما يمكن دمج أجهزة الاستشعار مع أي ركيزة دون تمحيص شديد لخصائصها. وذلك لأن المواد الموصلة يتم نسجها في الملابس.

المرحلة الثالثة: أجهزة الاستشعار وتطبيقاتها:

تعتمد العلامة التي يتم استشعارها في تطبيق معين على نوع جهاز الاستشعار والتطبيق الذي يتم استخدامه من أجله. يعطي الشكل (11) لمحة عامة عن أجهزة الاستشعار المرنة المختلفة القابلة للارتداء المستخدمة في الرعاية الصحية ومراقبة النشاط.

ويلاحظ أن بعض التطبيقات الموضحة في الشكل (11)، جنبًا إلى جنب مع معاييرها الحسية، هي درجة حرارة الجسم، ومراقبة التنفس، وحركة العضلات، واستشعار الحركة واستشعار الرطوبة. بالنسبة لهذه التطبيقات، يتم رصد تباين معلمات الاستشعار المختلفة اعتمادًا على معلمة المراقبة. حيث يتم تحليل التغير في درجة الحرارة من خلال تحليل التباين الحالي، بينما بالنسبة لنبض القلب ومراقبة الإجهاد، يكون التغيير في مقاومة مع الزمن. تم استخدام أجزاء مختلفة من الجسم، مثل القدم والمعصم واليد والوجه والعنق وما إلى ذلك، ولربط جهاز الاستشعار لأغراض الاختبار.

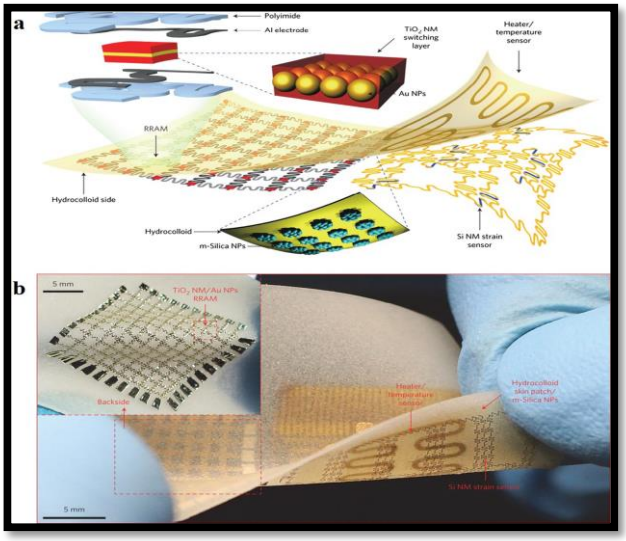


الشكل (11) التطبيقات المختلفة لأجهزة الاستشعار المرنة القابلة للارتداء.

ويوضح الجدول (1) قائمة بالتطبيقات المختلفة للمستشعرات المرنة القابلة للارتداء في مجال الرعاية الصحية. حيث تشمل التطبيقات بخلاف تلك استشعار الإجهاد، الذي يتم تحقيقه بواسطة مستشعر ضغط يمكن ارتداؤه مصنوع من أسلاك الذهب النانوية.

الجدول (1) تطبيقات مختلفة ومرفق اجهزة استشعار المرنة التي يمكن ارتداؤها.

الوضع على جسم الانسان	نوعية منصة الاستقبال	نوعية الإشارات الفيزيقية	التطبيق في الرعاية الصحية الشخصية
القدم	وسادة داخل الحذاء	توزيع الضغط	الإصابة أثناء ممارسة أي نشاط رياضي
الرسغ	رقعة على هيئة حزام	توزيع درجة الحرارة موجة ضغط الدم موجة الشريان الشعاعي	الكشف عن اضطرابات القدم لدى مرضى السكر تشخيص أمراض القلب والأوعية الدموية
اليد	رقعة على هيئة حزام	حركات الإنسان	حركة اليد
الوجه	رقعة قماشية	حركة العضلات	تحليل تغيرات تعبيرات الوجه مراقبة تصلب الجلد
الرقبة	رقعة على هيئة حزام	النبضات الوريدية اهتزاز الصوت حركة العضلات	سكتة قلبية الحبال الصوتية التالفة اضطرابات في الجهاز التنفسي



الشكل (12) (a) رسم تخطيطي للعناصر والطبقات المختلفة المستخدمة في جهاز استشعار يمكن ارتداؤه.

(b) الحجم الأصلي وسمك جهاز الاستشعار

وقد أظهر جهاز الاستشعار تغيرًا في المقاومة بجهد تشغيل يبلغ 1,5 فولت واستهلاك طاقة يبلغ حوالي 30 ميكرون. كانت الحساسية ووقت الاستجابة 1,14 كيلو باسكال -1 و17 مللي ثانية على التوالي. كان جهاز الاستشعار أيضًا مستجيبًا للانحناء والضغط والقوة والاهتزازات الصوتية. تم تشخيص وعلاج اضطرابات الحركة باستخدام مستشعر مرن قائم على السيليكون يحتوي على مجموعة من أكسيد التيتانيوم NPs (TiO2).

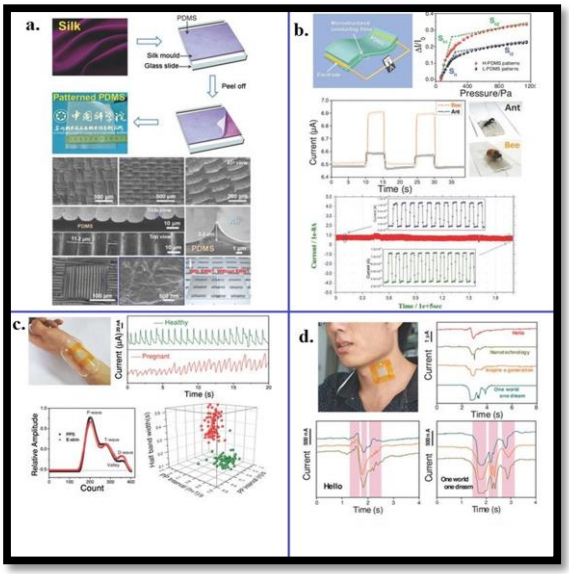
كما يحتوي جهاز الاستشعار أيضًا على مستشعر درجة الحرارة ومستشعر إجهاد ومواقع لزج مائي. يوضح الشكلان (12) (a) و (b) الحجم التخطيطي والأصلي لجهاز الاستشعار المطور. وقد تمت مراقبة النشاط العضلي للشخص عن طريق تحليل التغير في التيار والمقاومة مع مسح التردد بين النطاقات المختلفة (0-0.5 ، 0.5-0.7 ، 0.7-0.9 و> 0.9 هرتز). وتم تحقيق الإجهاد واستشعار درجة الحرارة عن طريق قياس التغير في المقاومة. مع الحالة الأولية لحالة المقاومة العالية، أدى تطبيق الضغط إلى تقليل مقاومة الخرج. كانت الحساسية التي أظهرها مستشعر درجة الحرارة 0,086 درجة مئوية.

وقد تم تطوير أجهزة الاستشعار باستخدام بوليمرات موصلة مثل PEDOT: كما تم استخدام PSS أيضًا لاستشعار الإجهاد وواجهات الإنسان والآلة. وتم استخدام الأنابيب النانوية الكربونية أحادية الجدار (SWCNTs) كمادة موصلة. وقد أظهر جهاز الاستشعار حساسية عالية مع قدرة شد 100٪ وعامل قياس 62٪. كما تم الإبلاغ عن مستشعرات مرنة يمكن ارتداؤها تعتمد على الاستشعار الكهروكيميائي ، والتي تحدد التغيير في التيار بعدد الانحناءات التي تم إجراؤها على جهاز الاستشعار. وتم تطوير أجهزة الاستشعار باستخدام تقنية طباعة الشاشة الحريرية واستخدمت

لاستشعار الجلوكوز. ويتكون جهاز الاستشعار من أقطاب Ag / AgCl على ركيزة PEN. وتم استخدام أجهزة الاستشعار التي تم تطويرها باستخدام أقطاب كربون مطبوعة على القماش مدمجة في الأقمشة كأجهزة لمراقبة الأس الهيدروجيني. ويحدد جهاز الاستشعار التغير في درجة الحموضة الذي يحدث أثناء التمرين، ولا سيما بالنسبة للأشخاص المشاركين في الرياضة وألعاب القوى. ويعتبر الجلد الإلكتروني أو الاصطناعي هو فئة أخرى تم فيها تنفيذ أعمال مهمة في السنوات الأخيرة.

ويشير الجلد الإلكتروني إلى تطوير جهاز استشعار صناعي يحاكي الوظائف التي يؤديها جلد الإنسان. ويعد بديل للجلد الطبيعي للأطراف الصناعية والأشخاص الذين يواجهون فقدان الجلد. وقد تم استخدام SWCNTs وPDMS لتطوير هذا الجلد إليكتروني فائق الحساسية بحيث يمكنه مراقبة الإشارات الفسيولوجية البشرية. وتم استخدام حرير عالي الجودة يمتلك نسيجًا داخليًا دقيق التنظيم لنمذجة PDMS ليكون له مظهر جلد الإنسان، وتم تسجيل التغيير في التيار للضغط المطبق على جهاز الاستشعار. كما تم أيضًا اختبار حيوانات مثل النمل والنحل على سطح جهاز الاستشعار للتحقق من حساسيته، وتم استخدام جهاز الاستشعار أيضًا لمراقبة التغيرات في الإشارات التي تحدث بسبب حركة العضلات أثناء الكلام. وتوضح الأشكال (13) (a) - (d) التطبيقات كما هو موضح لهذا جهاز الاستشعار. فئة أخرى من أجهزة الاستشعار المرنة القابلة للارتداء هي مستشعرات المجال المغناطيسي، والتي لها تطبيقات محتملة للمفاصل الاصطناعية وصمامات القلب.

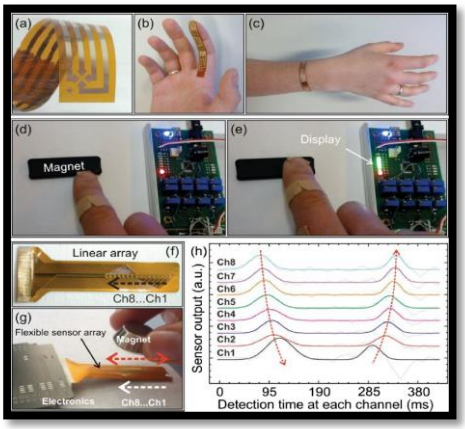
وتعد أجهزة الاستشعار، التي تعمل على أساس وفق تأثير هول ، من شأنها أن تسبب تغيرًا في الجهد (الجهد) عندما يطبق المجال المغناطيسي بصورة عموديَّة على التيار. تم تشكل طبقة ثنائية من الكروم (Cr) والبزموت (Bi) كمسار موصل مع Cr كطبقة لاصقة و Bi كمسار موصل. كما تم بناء هذه الطبقة الثنائية على رقائق ركيزة بوليميد (PI) أو بولي إيثر إيثر كيتون (نظرة خاطفة). وتكون سماكة الطبقة الثنائية والركيزة 2 ميكرومتر و 25 ميكرومتر ، على التوالي. تم يتم الحصول على حساسية −2.3 −1 V (AT) بواسطة جهاز الاستشعار.



الشكل (13). استخدام جهاز الاستشعار المستند إلى SWCNT – PDMS لتطبيقات مختلفة. (a) نقش PDMS بالحرير عالي الجودة. (b) اختبار جهاز الاستشعار مع حيوانات مختلفة لتحديد التغيير في الاستجابة. (c) مراقبة نبض العضلات باستخدام جهاز الاستشعار. (d) استجابة جهاز الاستشعار من حيث التيار مقابل الوقت لحركة العضلات التي تحدث بسبب الكلام.

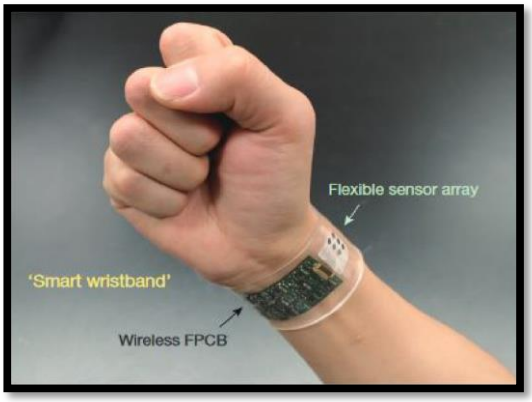
يوضح الشكل (14) تمثيلًا تصويريًا لجهاز الاستشعار وتطبيقه وتطبيقاته انتاج. بعد تركيب جهاز الاستشعار على الإصبع والمعصم، تم تغيير موضعه النسبي فيما يتعلق بمغناطيس دائم لتحديد التغير في جهده. تم تصنيع مجموعة من ثماني مستشعرات وعملت عليها لتحديد الاستجابة المشتركة لمواضع أجهزة الاستشعار فيما يتعلق بمغناطيس دائم.

وتشمل الإلكترونيات المرنة الأخرى القابلة للارتداء تطوير لوحات الدوائر المطبوعة المرنة (FPCBs). تعتبر FPCBs مفيدة للغاية لأنها تشمل جميع الدوائر المطلوبة لرصد البيانات ونقلها. وأحد تطبيقات FPCBs هو تطوير مصفوفات مجسات يمكن ارتداؤها لتحليل التعرق في الموقع. ويعتبر العرق أو التعرق من العوامل المهمة التي يمكن مراقبتها لتحليل التغيرات الفسيولوجية المختلفة التي تحدث داخل الجسم.



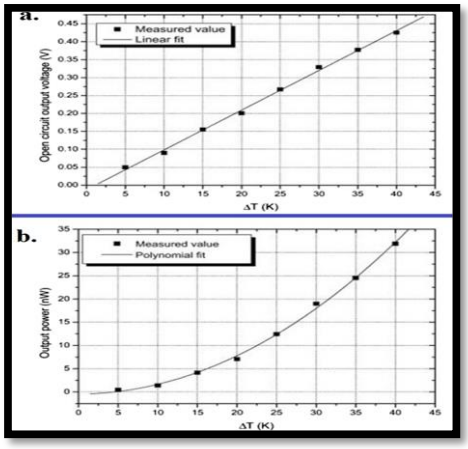
الشكل (14) (a) و (b) و (c) أجهزة الاستشعار وتثبيتها على الإصبع وفوق الرسغ. (d) و (e) اختبار التغير في الجهد بسبب الحركة الموضعية للمستشعر فيما يتعلق بمغناطيس دائم. (f) و (g) اختبار مجموعة أجهزة الاستشعار البيولوجية بمغناطيس دائم. (h) استجابة صفيف أجهزة الاستشعار في الجهد مقابل الوقت

تم إرفاق مجموعة من ستة مستشعرات بـ FPCB والتي تحتوي على مستشعرات لاختبار مكونات مختلفة من العرق، مثل الجلوكوز وحمض الجلوكوز وأكسيداز الجلوكوز وأكسيداز اللاكتات. وتم تمرير البيانات التي تتلقاها أجهزة الاستشعار من خلال مكبر للصوت وعاكس ومرشح تمرير منخفض قبل إرسالها إلى متحكم مدمج للتحويل من التناظرية إلى الرقمية (ADC). ثم يتم إرسال البيانات الرقمية إلى الحوسبة السحابية بمساعدة جهاز إرسال واستقبال Bluetooth.



الشكل (15) صورة لوحة دوائر مطبوعة لاسلكية مرنة مثبتة حول المعصم

ويوضح الشكل (15) صورة FPCB المركبة على معصم الشخص. حيث تم تسجيل الاستجابة في المقاومة والتيار والجهد فيما يتعلق بالوقت. وقد تراوحت درجة الحرارة بين 20 درجة مئوية و40 درجة مئوية للأغراض التجريبية. وتم تطوير مولدات كهربائية حرارية منخفضة الطاقة له أيضًا استخدام لأجهزة الاستشعار البيومترية. تُستخدم مستشعرات القياسات الحيوية في العيش بمساعدة البيئة (AAL) لمراقبة البيانات الفسيولوجية المختلفة.



الشكل (16) استجابة المولد الحراري الكهربائي من حيث (أ) الطاقة و (ب) الجهد مع تغير درجة الحرارة

كما تم إنشاء مجموعة من 100 مزدوج حراري من الأغشية الرقيقة مع سبائك من Sb2Te3 و Bi2Te3 على شريط Kapton، والتي ولّدت جهدًا خرجًا وقدرة 430 mV و 32 nW ، على التوالي ، عند 40 درجة مئوية. تمت مراقبة استجابة الأغشية الرقيقة من حيث الجهد والطاقة مع تغير درجة الحرارة بين الوصلات الساخنة والباردة كما هو موضح في الشكل (16).

الـــمـــراجـــع

Daniela Iannazzo & at all. (2020). Smart Biosensors for Cancer Diagnosis Based on Graphene Quantum Dots. https://www.mdpi.com/2072-6694/13/13/3194 (Accessed: 10 September 2021)

George Knopf, Amarjeet S. Bassi (2019). Smart Biosensor Technology, 2nd Edition https://www.routledge.com/Smart-Biosensor-Technology/Knopf-Bassi/p/book/9780367570651. (Accessed: 15 September 2021)

SusritaSahoo & at all. (2020). Smart Biosensors in Medical Care, https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128207819000024?via%3Dihub (Accessed: 1 September 2021)