

## نمذجة ومحاكاة حساس الضغط السعوي النانوي باستخدام COMSOL Multiphysics 5.0

م. كندا غسان محمد\*

(تاريخ الإيداع 2022/9/26 . قَبْلُ للنشر في 2023/1/29 )

### □ ملخص □

تُعدّ حساسات الضغط السعوية من بين أكثر الأنظمة الكهروميكانيكية الصغيرة (MEMS) الواعدة في السنوات الأخيرة، وذلك لاستهلاكها المنخفض للطاقة، والموثوقية العالية، ويتم الآن استكشاف حساسات Nano-MEMS على نطاق واسع حيث ظهرت هذه الحساسات من تقنية النظم الكهروميكانيكية الصغرى MEMS وتمتعت بالعديد من المزايا مقارنة بحساسات MEMS التقليدية (بحجم ميكرون)، ودخلت في الكثير من التطبيقات في مجالات متعددة مثل الرعاية الطبية والصحية والسيارات وغيرها كونها تمتلك العديد من السمات التي تجعلها فريدة ومميزة للغاية، مثل: الحجم الصغير، والكتلة المنخفضة، والحساسية العالية، وانخفاض تكلفة الإنتاج. بالإضافة الى انها تعد مناسبة تمامًا لتطبيقات استشعار الضغط المنخفض التي تتراوح من عدد قليل من باسكال إلى كيلو باسكال.

انطلاقاً من أهمية حساسات الضغط القائمة على Nano-MEMS نقدم في هذا البحث تصغير أبعاد حساس الضغط السعوي ونقله من المستوى الميكروي الى المستوى النانوي بالإضافة الى النمذجة والمحاكاة ثلاثية الأبعاد للتصميم المقترح باستخدام برنامج COMSOL Multiphysics. ومقارنة نتائج المحاكاة مع النتائج الحسابية لإظهار دقة المحاكاة.

أظهرت النتائج أن التصميم المقترح ذو الأبعاد 850\*850nm وسماكة 65nm المعتمد على مادة Polydimethylsiloxane يعطى أقصى انحراف للصفحة بمقدار  $6.5 \times 10^{-5}m$  عند تطبيق ضغط 1kPa، في حين تبلغ السعة الأولية للحساس  $10^{-4}PF$  أما السعة بعد تطبيق الضغط بلغت 0.5pF. وتعدّ هذه النتائج أعلى نتائج تم الحصول عليها باستخدام أبعاد نانوية مقارنة مع الدراسات السابقة.

**الكلمات المفتاحية:** حساس الضغط السعوي، Nano-MEMS، COMSOL Multiphysics.

\* مهندسة حاصلة على درجة الماجستير في هندسة تكنولوجيا الالكترونيات - كلية هندسة تكنولوجيا المعلومات والاتصالات - جامعة طرطوس .

# Modelling & Simulation of Nano Capacitive Pressure Sensor Using COMSOL Multiphysics 5.0

(Received 26/9/2022 . Accepted 29/1/2023)

## □ ABSTRACT

Capacitive pressure sensors are among the most promising microelectromechanical systems (MEMS) in recent years, due to their low power consumption and high reliability, and Nano-MEMS sensors are now being widely explored as these sensors emerged from MEMS technology and have many advantages. Compared to traditional MEMS sensors (micron size), it has entered into many applications in various fields such as medical and health care, automobiles, etc., as it has many features that make it very unique and distinctive, such as: small size, low mass, high sensitivity, and low production cost. In addition, it is well suited for low pressure sensing applications ranging from a few Pas to a KPa. Based on the importance of pressure sensors based on Nano-MEMS, we present in this research minimizing the dimensions of the capacitive pressure sensor and transferring it from the micro level to the nano level, in addition to the three-dimensional modeling and simulation of the proposed design using the COMSOL Multiphysics. And compare the simulation results with the computational results to show the accuracy of the simulation. The results showed that the proposed design with dimensions 850\*850nm and thickness 65nm based on Polydimethylsiloxane gives a maximum deflection of the plate by  $6.5 \times 10^{-5}$  m when applying pressure of 1kPa, while the initial capacitance of the sensor is  $10^{-4}$  PF while the capacitance after applying pressure is 0.5pF. These results are the highest results obtained using nanoscale compared to previous studies.

**Key words:** capacitive pressure sensor, Nano-MEMS, COMSOL Multiphysics.

## 1- المقدمة:

إنَّ العصر الذي نعيشه هو عصر التَّقدم العلميِّ والتَّكنولوجيِّ ومع التَّقدُّم الكبير في تقنيَّات تصنيع أنصاف التَّوافل، أصبح من الممكن استخدام تقنيَّة micro-machine للأجزاء المتحرِّكة على ركيزة السيليكون [1][2][3]. وهكذا، ظهرت تقنيَّة الأنظمة الكهروميكانيكيَّة الدَّقيقة (MEMS). وأصبحت MEMS الخيار الأمثل في مجال تصنيع الحساسات بسبب العديد من المزايا مثل الحجم الصغير والوزن المنخفض وقابليَّة التَّصنيع والاستهلاك المنخفض للطَّاقة والتَّكلفة المنخفضة.

## 2- مشكلة البحث:

تتطلَّب التَّطبيقات الحاليَّة للحساسات إجراء قياسات عالية الدَّقة. لذلك ستكون هناك حاجة إلى حساسات عالية الكثافة مصنَّعة في هياكل صغيرة الحجم، والتي لا يمكن تحقيقها باستخدام تقنيات القياس التَّمودجية. لكن، ومع تقدُّم تقنيَّة MEMS (Micro-electromechanical Systems)، يمكن تصنيع الأجهزة ذات الحجم الصَّغير. حيث تدمج تقنيَّة MEMS الهياكل الميكانيكيَّة والمكوَّونات الكهربيَّية لإنشاء أجهزة في منطقة واسعة من التَّطبيقات مثل حساسات الضَّغط، ومقاييس التَّسارع، والميكروسكوبيَّات... إلخ. تُوفِّر هذه الميزات إمكانيَّات لتصنيع هياكل خفيفة الوزن وصغيرة الحجم وعالية الكثافة (بالاستفادة من التَّقنيات الهائلة المستخدمة في النُّظم الكهروميكانيكيَّة الصَّغرى) لتحسين الأداء وتقليل تكاليف الأنظمة الحسيَّة التَّقليديَّة. بالإضافة إلى ذلك، تمَّ تحسين حساسيَّة الحساسات باستخدام تقنيَّة MEMS نظراً لارتفاع مساحة السَّطح إلى نسبة الحجم وبالتالي نسبة الإشارة إلى الضَّجيج العالية (SNR). ظهرت MEMS بمساعدة تطوير عمليَّات تصنيع الدوائر المتكاملة (IC)، حيث يتمُّ تصنيع أجهزة القياس والمشغلات ووظائف التَّحكم في السيليكون. مع إمكانيَّة دمج دوائر التَّوصيل إلى جانب الحساس، بالتَّالي الحصول على حساس ذكي يعمل بكامل طاقته [4].

تجري حالياً الكثير من الأنشطة البحثيَّة لنقل الحساسات من حجم الميكرون إلى حجم نانو. كون الحساسات ذات الحجم النَّانوي تتمتع بالعديد من المزايا مقارنة بحساسات MEMS التَّقليديَّة (حجم ميكرون) وأهمُّها الكتلة المنخفضة، والقوَّة الكهربيَّية العالية، وتردُّدات رنين ميكانيكيَّة عالية، ونسبة سطح إلى حجم عالية. يمكننا تعريف (NEMS) (Nano-electromechanical Systems) أنَّها تقنيَّة دمج الإلكترونيَّات والمكوَّونات الميكانيكيَّة على شريحة من مقياس النَّانو. باستخدام تقنيَّة NEMS، طوَّر الباحثون أجهزة مثل الحساسات والمشغلات ومقاييس التَّسارع والعديد من أجهزة النَّانو الأخرى. ومن المتوقَّع أن يصل سوق NEMS العالمي إلى 108.88 مليون دولار بحلول عام 2022، حيث جذبت حساسات الضَّغط القائمة على NEMS اهتماماً كبيراً نظراً لمزاياها العديدة فقد تمَّ استخدامها في قياس الضَّغط في بيئات مختلفة [5].

## 3- الدراسات المرجعية:

تعدّ النمذجة الرياضية والمحاكاة الحاسوبية لأي نظام فيزيائي عمل ضروري للتصميم الفعال للنظام والتنبؤ بدقة أدائه [6]. لذلك كان لابد لحساس ضغط MEMS السعوي من أن يأخذ حيزاً كبيراً من اهتمام الباحثين لتصميم الحساسات ذات الأداء الأمثل وللحصول على الحد الأدنى من الحجم ولاسيما مع زيادة تصغير الأجهزة الإلكترونية. حيث قام الباحثون في [7] بتصميم ومحاكاة حساسات الضَّغط السَّعوية والمقاومة للضَّغط القائمة على MEMS. تمَّت

مقارنة حساسية وانحراف كلا الحساسين من خلال نتائج المحاكاة لمعرفة مدى ملائمة الحساسين للتطبيقات المختلفة ومساعدة المصنّعين على معرفة تأثير البارامترات الهندسية للحساس مثل الطول والعرض، والسماكة وغيرها في أداء الحساس. وقد أوضحت النتائج أنّ حساس MEMS السعوي أكثر حساسية من Pizoresistive، وأنّه أكثر ملائمة للتطبيقات الطبية الحيوية مثل قياس ضغط الدّم.

كما قدم الباحثون في [8] تصميم لحساس الضغط السعوي بأبعاد  $1000\mu\text{m} \times 1000\mu\text{m}$  وسماكة  $15\mu\text{m}$  وفجوة  $3\mu\text{m}$ ، مصنوع من البولي سيليكون، أعطت نتائج المحاكاة باستخدام COMSOL سعة وقدرها  $0.11\text{pF}$ . بيّن الباحثون في [9] المقدمة الأساسية لحساسات ضغط MEMS. كما تضمّنت الأنواع المختلفة لحساسات الضّغط ومبادئ التشغيل الخاصّة بها. تضمّنت أيضاً نمذجة ومحاكاة حساسات الضّغط السّعوية والكهروضغطيّة (piezoelectric) والمقاومة للضّغط (piezoresistive) باستخدام COMSOL Multiphysics. وأفادت هذه الدّراسة بأنّ حساس الضّغط السّعوي يتميّز بتصنيع بسيط وتكلفة منخفضة ودقّة أعلى مقارنة بالتّوعين الآخرين. بينما ركزت الدراسة [10] بشكل أساسي على حساس الضّغط بالسعة لتطبيقات مراقبة الصحة، حيث اقترحت تصميم لحساس الضّغط بأبعاد  $10000\mu\text{m} \times 10000\mu\text{m}$  وسماكة  $525\mu\text{m}$  باستخدام 9 نوابض على الأطراف وقد أعطت النتائج سعة وقدرها  $0.052\text{pF}$  عند تطبيق  $1\text{kPa}$ . كما قدم الباحثون في [11] تحليلات مفصّلة لشكل الغشاء (القطب العلوي) لمقارنة أداء حساس الضّغط السّعوي القائمة على رقائق معدنيّة. بالإضافة إلى إجراء تحليل مفصّل لاستخدام المواد الجديدة والانحراف في أغشية مختلفة الشّكل لتكون كمؤشّر أداء لحساس الضّغط السّعوي. تمّ تصنيع وتحليل أغشية من خمسة أشكال مختلفة (دائرة، قطع ناقص، خماسي، مربع، ومستطيل).

من النّتائج التي تمّ الحصول عليها، يحتوي الغشاء ذو الشّكل البيضوي على قدر أقل من الفاقد في المواد مع أداء مشابه مقارنة بالأغشية ذات الشّكل الدائري. بالنسبة لتقنيّات النّصنيع القابلة للتّطوير بأقل هدر للمواد، الغشاء ذو الشّكل المربع أكثر فائدة. بالإضافة إلى ذلك، تظهر الأغشية ذات الشّكل المربع استجابة خطيّة. تصبح الاستجابة غير خطيّة ونحن نتحرّك نحو أغشية دائرية الشّكل.

نلاحظ أنّ جميع الدّراسات السّابقة اقتصرّت على دراسة الحساس السّعوي ذو الأبعاد الميكروبيّة ومع ذلك، فإنّ النّمذجة الرّياضيّة والمحاكاة التّحليليّة مع مناقشة واسعة حول الخصائص المختلفة (مثل انحراف الصّفيحة، وتغيّر السّعة) لحساسات الضّغط السّعوية النّانويّة ذات الصّفيحة المربّعة مثبّنة الحواف غير متوقّرة في الدّراسات السّابقة.

#### 4- أهمية البحث وأهدافه:

تبرز أهمية هذا البحث من أهمية الحساسات النّانويّة وكونها تُستخدَم في الكثير من التّطبيقات كونها تتمتع بالعديد من السّمات التي تجعلها فريدة ومميّزة للغاية منها: الحجم الصّغير، الدقّة العالية، الاستهلاك المنخفض للطّاقة والحساسيّة العالية.

يهدف هذا البحث إلى تصغير أبعاد حساس الضّغط السّعوي ونقله من حجم الميكرون إلى الحجم النّانوي، بالإضافة إلى النّمذجة الرّياضيّة مع نمذجة ثلاثيّة الأبعاد للحساس النّانوي المقترح، من خلال:

• اعتماد تقنيّة Nano-MEMS للمساعدة في دمج الخصائص الميكانيكيّة والكهربائيّة على شريحة واحدة بحجم

النانو.

- الاعتماد على مادة متعدّد ثنائي ميثيل السيلوكسان (PDMS) كمادّة جديدة.
- دراسة مبدأ عمل حسّاس الضّغط السّعوي ذو الصّفحة المربّعة مثبتة الحواف.
- الاعتماد على نظرية الانحراف ومعادلات الانحناء لدراسة انحناء الطبقة العلوية للحساس السّعوي عند تعرّضه للضّغط.
- التّمدجة ثلاثية الأبعاد للتّصميم المقترح باستخدام برنامج COMSOL Multiphysics 5.4.

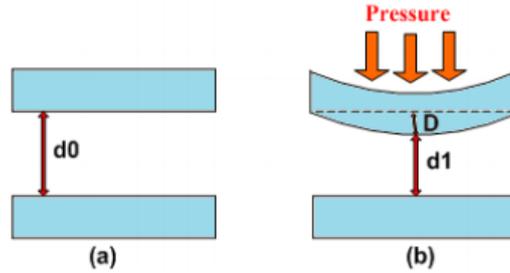
## 5- طرائق البحث ومواده:

### 1-5 مبدأ عمل الحساس:

يتكون الحساس من لوحين (صفيحتين) متوازيين بمساحة متساوية A لتشكيل أقطاب المكثف مفصولة بمسافة  $d_0$  كما هو موضح في الشكل (1-a). التعبير الرياضي عن السعة الكهربائية للوحين المتوازيين يُعطى على النحو الآتي:

$$c_0 = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d_0} \quad (1)$$

حيث  $\epsilon_0$  هي ثابت العازلية للخلاء وتساوي  $8.854 \cdot 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$ ،  $\epsilon_r$  هي السماحية النسبية للمادة العازلة بين أقطاب المكثف، A هي مساحة التداخل بين الأقطاب الكهربائية ( $\text{m}^2$ )،  $d_0$  الفاصل بين الأقطاب الكهربائية (m). في حساسات الضغط السعوية القائمة على MEMS، يتم تحقيق تغير السعة عن طريق تقليل فجوة الفصل بين الألواح نتيجة للضغط المطبق. حيث يؤدي تطبيق الضغط إلى انحناء صفيحة المكثف بحيث تقل فجوة الفاصلة بين الصفيحتين كما هو موضح في الشكل (1-b). يؤدي تقليل فجوة الفصل إلى زيادة سعة الحساس حسب حجم الضغط المطبق.



الشكل (1) يمثل انحناء الصفيحة عند تطبيق الضغط

بعد تطبيق الضغط على اللوحة العلوية، لا يمكن استخدام المعادلة (1) لتحديد سعة حساس الضغط، حيث تسبب القوة المؤثرة على القطب العلوي انحرافاً وبالتالي تغيرات في المسافة الفاصلة بين القطبين لذلك سوف نقوم بحساب الانحراف حسب نظرية الانحراف [12].

### 2-5 التّصميم المقترح لحساس الضّغط السّعوي القائم على Nano-MEMS

تعتبر حساسات الضّغط السّعوية مفيدة مقارنةً بحساسات الضّغط الأخرى حيث أنها تستهلك طاقة أقل، وحساسية منخفضة لدرجة الحرارة، ويمكن أن تكون فعّالة في قياس قيم الضّغط المنخفض عدا عن سهولة تصنيعها Nano-MEMS. في هذا الجزء سوف نقدّم نموذج ثلاثي الأبعاد لحساس الضّغط السّعوي النّانوي المستند إلى [13]

. COMSOL Multiphysics، أي باستخدام FEM ذو الغشاء المرّع حيث يتمّ إجراء التّحليل باستخدام أداة . وهذا يشمل الانحراف الأعظمي للغشاء المرّع وسعة الحساس قبل وبعد تطبيق الضّغط

#### ❖ منهجية التّصميم والمحاكاة

، يكون الشّكل المختار هو الغشاء المرّع، كونه يوفرّ مزيداً من انحراف الغشاء مقارنةً NEMS لتصميم غشاء ، [14] بأشكال الأغشية الأخرى مثل الدائرية والمستطيلة

والهواء كعازل كهربائي. يتمّ (PDMS) Polydimethylsiloxane في هذا التّصميم، المواد المختارة هي ومركباتها على نطاق واسع لأنّها توفرّ العديد من المزايا مثل سهولة التّصنيع، وانخفاض التّكلفة PDMS استخدام [15].

#### ❖ مواصفات التّصميم

أبعاد التّصميم المقترح لحساس الضّغط السّعوي ذو الغشاء المرّع الشّكل. هنا يتكوّن الغشاء (1) يوضّح الجدول ويعملان Polydimethylsiloxane (PDMS) من 5nm وسماكة 850 × 850nm والرّكيزة ذات البعد المتساوي 65nm كقطبين كهربائيين متوازيين في الحساس. يشغل الهواء الجزء الفاصل بين الغشاء والرّكيزة بسماكة

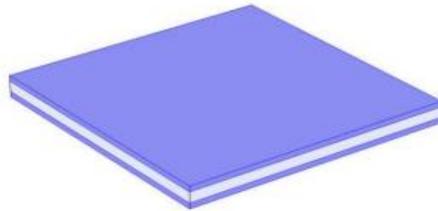
جدول (1): الأبعاد وخصائص المواد

الطول	850nm
العرض	850nm
السماكة	5nm
الفجوة	65nm
معامل يونغ	750kpa
معامل بواسون	0.49
الضّغط المطبّق	1kpa

#### ❖ التّحليل الرياضي للتّصميم المقترح

##### ○ انحراف الغشاء (الطبقة العلوية للحساس)

يتمّ دراسة انحراف الغشاء ذي الحواف الثابتة وفقاً للضّغط المطبّق، وسيتمّ تثبيت الغشاء المرّع عند حوافّه كما هو موضّح في الشّكل (2) عندما يتمّ تطبيق الضّغط، فإنّ الغشاء سوف ينحرف.



الشّكل (2): الحساس السّعوي المقترح

يمكن الوصول إلى الانحراف الأعظمي للغشاء المرَبَع مَثَبَت الحواف حسابياً حسب نظرية الانحراف [16] بالعلاقة التالية:

$$(2) \quad w = 0.00126 \frac{qa^4}{D}$$

حيث: q الضغط المطبق a مساحة السطح D صلابة الانحناء للصفحة بالتعويض ببارامترات التصميم المقترح يكون الانحراف الأعظمي لغشاء الحساس التآنوي المقترح عند تطبيق ضغط 1kpa يساوي:

$$w = 0.00126 \frac{1 \times 850^4}{0.102 \times 10^{-19}} = 6.44 \times 10^{-5} m$$

علماً أن D هي صلابة الانحناء للصفحة وتكتب بالشكل الآتي:

$$K = D = -\frac{EI}{1-\nu^2} = -\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$$

حيث E معامل يونغ  $\nu$  نسبة بواسون l عزم العطالة h سماكة الصفحة بالتعويض ينتج الآتي:

$$\begin{aligned} D &= Eh^3/12(1-\nu^2) \\ &= 750 \times 10^3 \times (5nm)^3 / 12(1-0.49^2) \\ &= 0.102 \times 10^{-19} N.m \end{aligned}$$

○ سعة الحساس قبل وبعد تطبيق الضَّغط:

المبدأ المستخدم في تصميم حساس الضَّغط السَّعوي هو نفس مبدأ المكثِّفة ذات الصَّفائح المتوازية بالتالي فإنَّ السَّعة قبل تطبيق الضَّغط هي نفس سعة المكثِّفة وتُعطى بالعلاقة الآتية:

$$\begin{aligned} C_0 &= \epsilon_0 \epsilon_r A/d \\ &= 8.854 \times 10^{-12} (850nm)^2 / (65nm) \\ &= 0.98 \times 10^{-16} F \end{aligned}$$

أمَّا السَّعة بعد تطبيق الضَّغط فتُعطى بالعلاقة التالية [16]:

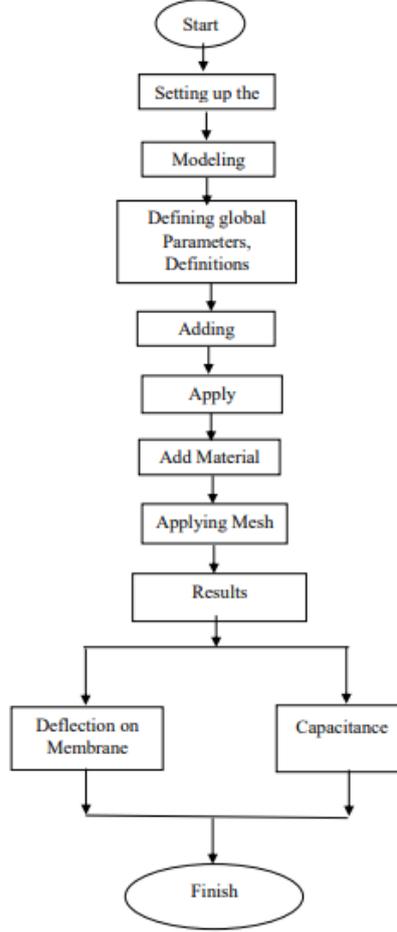
$$(3) \quad C = C_0 \left( 1 + \frac{1.25Pa^4}{2015dD} \right)$$

بالتعويض

$$\begin{aligned} &= C_0 (1 + 12.5 \times 1000 \times (850nm)^4 / 2015 \times 65nm \times 0.102 \times 10^{-19}) \\ &= 4787.536 \times 10^{-16} F = 0.47pF \end{aligned}$$

### 3-5 نمذجة ومحاكاة التصميم المقترح باستخدام COMSOL Multiphysics 5.0

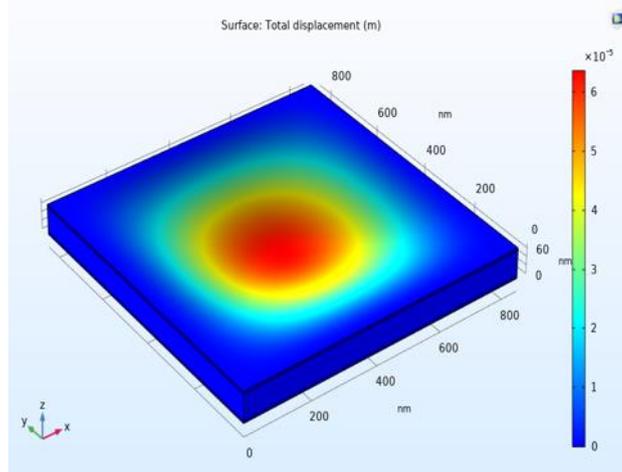
من COMSOL Multiphysics 5.0 باستخدام FEM 3D-Simulation تم تنفيذ عملية خلال تطبيق الخطوات الموضحة في المخطط الموضح بالشكل (3). وحصلنا على مايلي:



الشكل (3): خطوات التصميم باستخدام COMSOL

#### ○ انحراف الغشاء

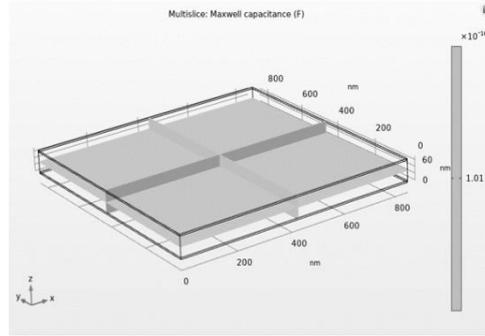
يوضح الشكل (4) انحراف سطح الحساس في اتجاه المحور Z عند تطبيق ضغط قدره 1kPa. نلاحظ من الشكل أن الانحراف الأعظمي يكون عند مركز الصفيحة بقيمة مقدارها  $6.5 \times 10^{-5} m$ . تظهر نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها باستخدام COMSOL اتفاقاً وثيقاً مع النتائج الرياضية التي تم الحصول عليها.



الشكل (4): الانحراف الأعظمي لغشاء الحساس

#### ○ السعة قبل تطبيق الضَّغط

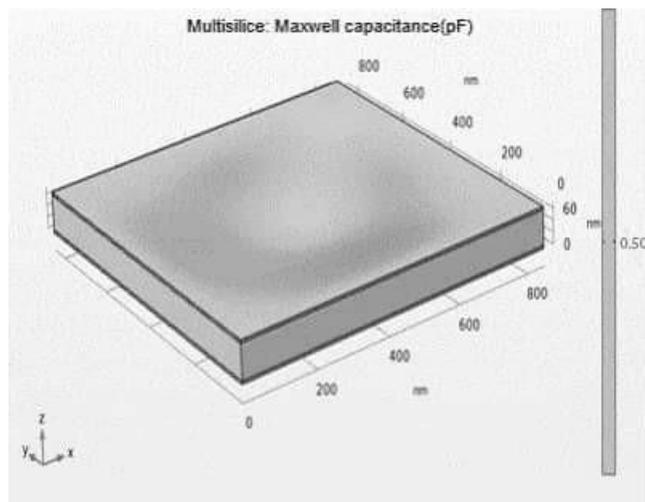
يوضِّح الشُّكل (5) سعة الحساس قبل تطبيق الضَّغط. نلاحظ من الشُّكل أنَّ السَّعة مقدارها  $1 \times 10^{-16} \text{F}$ . تظهر نتائج المحاكاة الَّتِي تمَّ الحصول عليها باستخدام COMSOL اتِّفاقاً وثيقاً مع النَّتائج الرياضِيَّة الَّتِي تمَّ الحصول عليها.



الشكل (5): سعة الحساس قبل تطبيق الضَّغط

#### ○ السعة بعد تطبيق الضَّغط

يوضِّح الشُّكل (6) سعة الحساس بعد تطبيق الضَّغط. نلاحظ من الشُّكل أنَّ السَّعة مقدارها  $0.5 \text{pF}$ . تظهر نتائج المحاكاة الَّتِي تمَّ الحصول عليها باستخدام COMSOL اتِّفاقاً وثيقاً مع النَّتائج الرياضِيَّة الَّتِي تمَّ الحصول عليها.



الشكل (6): السعة بعد تطبيق الضغط

يوضِّح الجدول (2) مقارنة بين القيم التي تمَّ الحصول عليها باستخدام برنامج COMSOL مع القيم التي تمَّ الحصول عليها حسابياً، ونلاحظ توافق كبير بين النتائج الحسابية ونتائج المحاكاة.

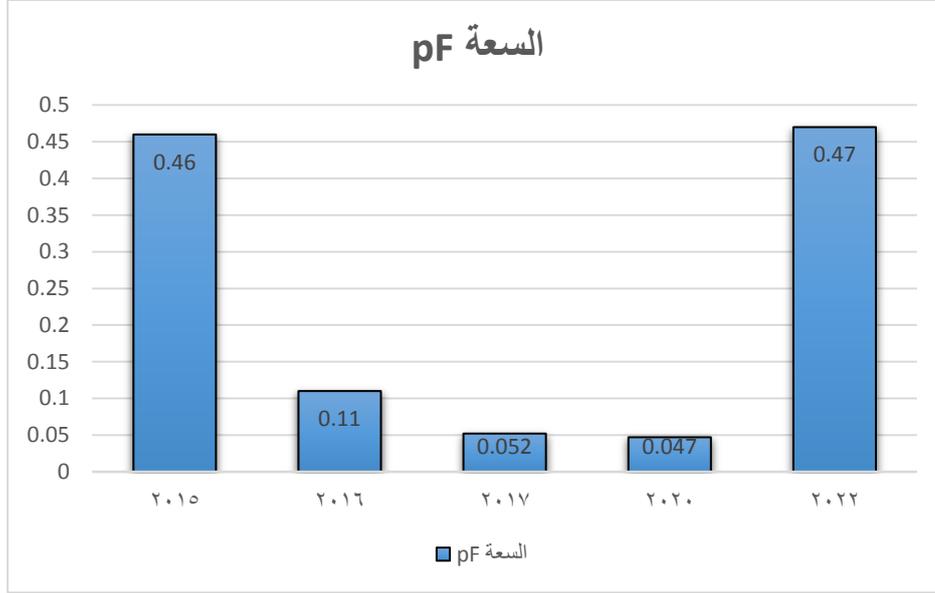
جدول (2): مقارنة بين النتائج الحسابية ونتائج المحاكاة

نتائج المحاكاة	النتائج الحسابية	
$6.5 \times 10^{-5} \text{m}$	$6.44 \times 10^{-5} \text{m}$	الانحراف الأعظمي
$1 \times 10^{-16} \text{F} = 0.0001 \text{pF}$	$0.98 \times 10^{-16} \text{F}$	السعة قبل تطبيق الضَّغط
0.5Pf	0.47pF	السعة بعد تطبيق الضَّغط

## 6- مقارنة وتقييم النتائج

يوضح الشكل (7) مقارنة نتائج الدراسات السابقة لسعة حساس الضغط السعودي مع الدراسة الحالية. في عام 2015 قُدم تصميم لحساس الضغط السعودي بأبعاد  $1500 \times 1500 \mu\text{m}$  مع فصل  $196 \mu\text{m}$  بين القطبين العلوي والسفلي وسماكة  $4 \mu\text{m}$  عند تطبيق ضغط  $1 \text{kPa}$  اعطى سعة  $0.45$  [17]. في عام 2016 قُدم تصميم لحساس الضغط السعودي بأبعاد  $1000 \times 1000 \mu\text{m}$  وسماكة  $15 \mu\text{m}$  وفجوة  $3 \mu\text{m}$ ، مصنوع من البولي سيليكون، أعطت نتائج المحاكاة سعة وقدرها  $0.11 \text{pF}$  [8]، بينما قُدمت دراسة في عام 2017 اقترحت تصميم لحساس الضغط بأبعاد  $10000 \times 10000 \mu\text{m}$  وسماكة  $525 \mu\text{m}$  باستخدام 9 نوابض على الأطراف وقد أعطت النتائج سعة وقدرها  $0.052 \text{Pf}$  عند تطبيق  $1 \text{kPa}$  [10]. أما في 2020 قُدمت دراسة لحساس الضغط السعودي بسماكة  $5 \mu\text{m}$  وفجوة  $0.53 \mu\text{m}$  وأعطت النتائج سعة وقدرها  $0.047 \text{Pf}$  [18]، في حين قُدمت الدراسة الحالية بتصميم مربع الشكل لحساس الضغط السعودي بأبعاد  $850 \times 850 \mu\text{m}$  وسماكة  $5 \mu\text{m}$  لطبقتي ال PDMS العلوية والسفلية وفجوة فصل  $65 \mu\text{m}$  من الهواء، أعطت نتائج المحاكاة الموافقة بشكل كبير للنتائج الرياضية سعة بقيمة  $0.47 \text{pF}$  ونلاحظ أن نسبة التحسن مقارنة بأعلى سعة محققة

عام 2015 هي 0.021% ويعود السبب في هذا النتيجة الى السماكة القليلة للغشاء بالإضافة الى المرونة العالية التي تتمتع بها مادة PDMS المستخدمة في التصميم.



الشكل (7): مقارنة نتائج الدراسات السابقة لسعة حساس الضغط السعوي مع الدراسة الحالية

## 7- النتائج والتوصيات المستقبلية

- من خلال النتائج التي توصل إليها البحث، تم استخلاص الملاحظات والاستنتاجات الآتية:
- اعتمد البحث تقنية Nano-MEMS كتقنية جديدة غير مستخدمة في الدراسات السابقة.
  - اعتمد البحث مادة Polydimethylsiloxane (PDMS) كمادة جديدة تتمتع بمرونة عالية يمكن استخدامها في تصميم حساس الضغط السعوي.
- التوصيات المستقبلية:
- دراسة تأثير درجة الحرارة على عمل حساس الضغط السعوي.
  - دراسة تأثير تغيير الوسط الفاصل بين الصفيحتين.

## المراجع:

1. Natifa ,R; Ahmed, A ; Sweha, R. The effect of using nanotechnology on contemporary buildings. Tartous University Journal for Studies and Scientific Research - Engineering Sciences Series, Vol. 4 No. 7(2020).
2. S. M. Ahmed, A. M. Hussain, J. P. Rojas and M. M. Hussain, "Solid state MEMS devices on flexible and semi-transparent silicon (100) platform," 2014 IEEE 27th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), San Francisco, CA, 2014, pp. 548-551.
3. Afisa, K; Sobeih, M; Khaija, R. Optimizing the performance of the SIMULATED ANNALING algorithm to improve the positioning of blocks within the FPGA chip. Tartous University Journal of Scientific Studies and Research\_ Basic Sciences Series, Vol. (3), No. (4)(2019).
4. Dagamseh, Ahmad, et al. "Modeling of a square-shape ZnO, ZnS and AlN membrane for mems capacitive pressure-sensor applications." International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization 11 (2020): 14.
5. Balavalad, Kirankumar B., PraveenKumar B. Balavalad, and Somanath Pidashetti. "Optimization of Nano Capacitive Pressure Sensor for Medical Applications." IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 1065. No. 1. IOP Publishing, 2021.
6. Mikhael ,M; Ali, K ; Jassem, Y. Detection, Diagnostics, and Modeling of an Autonomous Solar Power System Using Matlab. Tartous University Journal for Studies and Scientific Research -Engineering Sciences Series, Vol. 1 No. 1(2017).
7. Shaikh, M. Z., Kodad, S., & Jinaga, B. (2008). A comparative performance analysis of capacitive and piezoresistive MEMS for pressure measurement. Int. J. Comput. Sci. Appl., 201-204.
8. Diem N. Ho , Ngoc-Hanh Dang , & Vinh Q. Nguyen.(2016). Design of MEMS Capacitive Pressure Sensor for Continuous Blood Pressure Monitor (pp. 78 2-78 7).
9. Panwar, L. S., Panwar, V., & Kala, S. (2017). Modelling of different MEMS pressure sensors using COMSOL multiphysics. International Journal of Current Engineering and Technology, 7(1), 243-247.
10. MIJAR, Moodbidri. Comparative Study on Capacitive Pressure Sensor for Structural Health Monitoring Applications.
11. Khan, S. M., Mishra, R. B., Qaiser, N., Hussain, A. M., & Hussain, M. M. (2020). Diaphragm shape effect on the performance of foil-based capacitive pressure sensors. AIP Advances, 10(1), 015009.
12. Ganji, B. A., and NATERI M. SHAMS. "Modeling of capacitance and sensitivity of a mems pressure sensor with clamped square diaphragm." (2013): 1331-1336.
13. Ruth, S. R. A., Beker, L., Tran, H., Feig, V. R., Matsuhisa, N., & Bao, Z. (2020). Rational design of capacitive pressure sensors based on pyramidal microstructures for specialized monitoring of biosignals. Advanced functional materials, 30(29), 1903100.
14. Melennavar, S., & Kategeri, A. C. (2016). Theoretical Analysis of the Design of Different Shape Diaphragm for Piezoresistive Pressure Sensor. DOI, 10, 17577.
15. Cong, H., & Pan, T. (2008). Photopatternable conductive PDMS materials for microfabrication. Advanced Functional Materials, 18(13), 1912-1921.

16. Timoshenko, S., & Woinowsky-Krieger, S. (1959). *Theory of plates and shells* (Vol. 2, pp. 240-246). New York: McGraw-hill.
17. Ramesh, Akhil K., and P. Ramesh. "Trade-off between sensitivity and dynamic range in designing MEMS capacitive pressure sensor." *TENCON 2015-2015 IEEE Region 10 Conference*. IEEE, 2015.
18. Rao, K. S., Samyuktha, W., Vardhan, D. V., Naidu, B. G., Kumar, P. A., Sravani, K. G., & Guha, K. (2020). Design and sensitivity analysis of capacitive MEMS pressure sensor for blood pressure measurement. *Microsystem Technologies*, 26(8), 2371-2379.