

## دراسة تأثير الأبعاد الهندسية ونوع المادة في صفيحة حساس الضغط السعوي

د.م. حسن البستاني \*

كندا غسان محمد \*\*

(تاريخ الإيداع 2021/ 3 /1 . قُبل للنشر في 2021/ 8 /4 )

### □ ملخص □

تُعدّ حساسات الضغط السعوية من بين أكثر الأنظمة الكهروميكانيكية الصغيرة microelectromechanical systems (MEMS) الواعدة في السنوات الأخيرة، وذلك لاستهلاكها المنخفض للطاقة، والموثوقية العالية، كما يعدّ النموذج التحليلي الكامل لصفيحة الحساس الكهربائي ضرورياً لتحديد تأثير مقدار انحراف الصفيحة على عمل الحساس.

في هذا البحث، سنقوم ببناء النموذج الرياضي وإنجاز المحاكاة الحاسوبية لصفيحة الحساس مربعة الشكل ذات الحواف المثبتة لحساس الضغط السعوي القائم على تقنية MEMS. حيث ستتم الدراسة التفصيلية لنظرية انحراف الألواح والنمذجة الرياضية لانحناء الصفيحة باستخدام طريقة العناصر المنتهية Finite Element Method (FEM). كما سيتم النظر في هذا البحث في ثلاثة أنواع من المواد العنصرية: Zinc و Polydimethylsiloxane و sulfide ومطاط السليكون، بالإضافة الى دراسة تأثير اختلاف أبعاد الصفيحة ومادتها على مقدار الانحراف. ستتم المحاكاة باستخدام MATLAB والأداة البرمجية FEM CAD.

أظهرت النتائج أن انحراف الصفيحة يزداد بازدياد أبعادها، ومن بين المواد الثلاثة التي تمت دراستها، أظهرت صفيحة Polydimethylsiloxane انحرافاً أعلى عند مقارنتها بصفيحة مطاط السليكون و Zinc sulfide، كما أظهرت نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها باستخدام MATLAB اتفاقاً وثيقاً مع نتائج أداة FEM القياسية.

**الكلمات المفتاحية:** حساس الضغط السعوي، MEMS، طريقة العناصر المنتهية FEM.

\* مدرس في قسم هندسة النظم الحاسوبية والالكترونية - كلية هندسة تكنولوجيا المعلومات والاتصالات - جامعة طرطوس - سوريا  
\*\* طالبة ماجستير في قسم هندسة تكنولوجيا الالكترونيات - كلية هندسة تكنولوجيا المعلومات والاتصالات - جامعة طرطوس - سوريا

## Study the effect of geometric dimensions and material type on the capacitive pressure sensor plate

Dr.Hasan albustani\*  
kinda ghassan mohammad\*\*

(Received 1 / 3 / 2021 . Accepted 4 / 8 / 2021)

### □ ABSTRACT □

Capacitive pressure sensors have been among the most promising MEMS technology in recent years due to their low energy consumption, high reliability. A complete analysis of the sensor membrane is necessary to determine the effect of the amount of aberration on the sensor. In this paper, the modeling and mathematical simulation of the fixed-edges square-shaped membrane of the MEMS-based capacitive pressure sensor was performed. The detailed study of plate deflection theory and mathematical modeling of plate curvature was done using finite element method (FEM). Three types of membrane materials were considered: Polydimethylsiloxane, Zinc sulfide and silicon rubber and studied the effect of different dimensions of membrane and membrane material on the amount of deflection.

the Simulation results with MATLAB and FEM CAD tool showed that the deflection of the membrane increased with the increase in its dimensions. Among the three materials studied, the polydimethylsiloxane film showed higher deflection when compared to the silicone rubber and Zinc sulfide films. Simulation results obtained with MATLAB also show close agreement with the results of the standard FEM instrument.

**Key Words:** capacitive pressure sensor, MEMS, finite element method (FEM)

---

\*Teacher ,Faculty of information and communication Technology, ICT Department -Tartous University-Tartous- syria

\*\* Master student, Electronical Technology Engineering Department, Information and communication Technology Engineering, Tartous University, Syria.

**1- المقدمة:**

إنّ العصر الذي نعيشه هو عصر التقدم العلمي والتكنولوجي ومع التقدم الكبير في تقنيات تصنيع أنصاف النواقل، أصبح من الممكن استخدام تقنية micro-machine للأجزاء المتحركة على ركيزة السيليكون [3][2][1]. وهكذا، ظهرت تقنية الأنظمة الكهروميكانيكية الدقيقة (MEMS). وأصبحت MEMS الخيار الأمثل في مجال تصنيع الحساسات بسبب العديد من المزايا مثل الحجم الصغير والوزن المنخفض وقابلية التصنيع والاستهلاك المنخفض للطاقة والتكلفة المنخفضة.

تُستخدم الحساسات القائمة على MEMS لقياس المتغيرات الفيزيائية المختلفة مثل الإزاحة والضغط والإجهاد والتسارع والقوة وعزم الدوران والاهتزاز والتدفق ودرجة الحرارة والرطوبة، في مجالات متنوعة مثل الطب الحيوي والسيارات والفضاء والإلكترونيات [5][4]. ومن بين الأنواع المختلفة لحساسات الضغط، يُعدّ حساس piezoresistive pressure هو الأكثر شيوعاً يليه حساس الضغط السعوي [6]. حيث تتمتع حساسات piezoresistive pressure بمزايا مختلفة مثل سهولة التصنيع والخرج الخفي والموثوقية العالية. ومع ذلك، تتمتع حساسات الضغط السعوية بتحمل أفضل لتغيّر درجة الحرارة، ومدى ديناميكي كبير وحساسية أفضل مقارنة بحساسات piezoresistive pressure.

تقدم تقنية MEMS عمليات مختلفة لتصنيع الصفائح في تطبيقات مختلفة مثل الميكروفونات وحساسات الضغط والمضخات الدقيقة، وما إلى ذلك. يعتمد مبدأ العمل لجميع هذه الأجهزة على القوة المطبقة على الصفيحة التي تسبب انحراف الصفيحة. يُعدّ تحسين الصفيحة التحدي الرئيسي لتحقيق أفضل أداء للجهاز، كما تلعب الأشكال المختلفة للصفائح (المربعة والمستطيلة والدائرية) أيضاً دوراً مهماً في التطبيقات المختلفة [7].

تعدّ النمذجة الرياضية والمحاكاة الحاسوبية لأي نظام فيزيائي عمل ضروري للتصميم الفعال للنظام والتنبؤ بدقة أدائه [8]. لذلك كان لا بد من أن تأخذ نمذجة ومحاكاة حساس الضغط السعوي وصفحته حيزاً كبيراً من اهتمام الباحثين لتصميم حساسات صغيرة الحجم وتقييم أدائها ولاسيما مع زيادة تصغير الأجهزة الإلكترونية.

حيث قام الباحثون في [9] بنمذجة ومحاكاة الحساس السعوي ذو الصفيحة البيضوية، ودراسة البارامترات المؤثرة في انحراف الصفيحة، وتغير السعة، وتمت مقارنته مع حساس الضغط السعوي ذو الصفيحة الدائرية، ووجدوا أن حساسات الضغط السعوية ذات الصفيحة بيضوية الشكل لها خطية أفضل من حساسات الضغط ذات الصفيحة الدائرية. كما قام الباحثون في [10] بنمذجة الصفيحة المربعة الشكل لحساس الضغط السعوي باستخدام MATLAB وتقنية التكامل العددي البسيطة لفهم نظرية الانحراف المعقدة للألواح. واعتمد هذا التحليل على مادة البولييميد للصفيحة المربعة في حالة الحواف المثبتة، وظهرت نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها باستخدام MATLAB اتفاقاً مع نتائج الأداة البرمجية FEM القياسية والقيم النظرية.

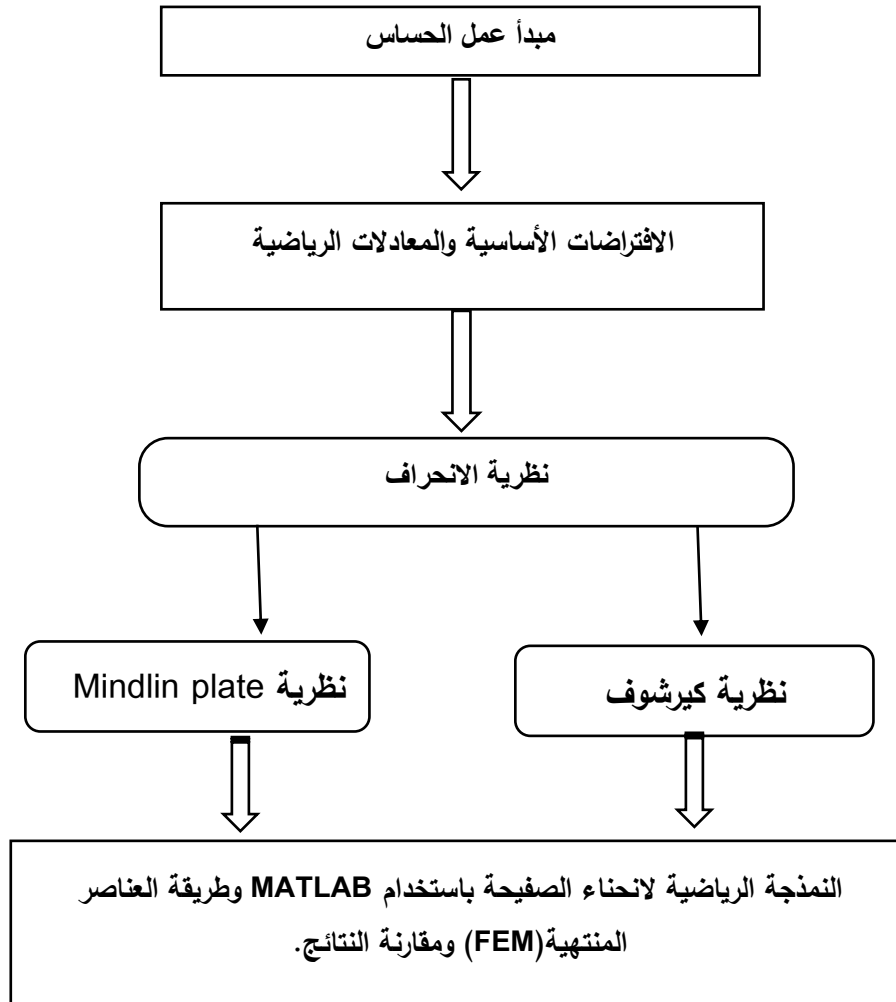
كما قدم الباحثون في [11] نمذجة ومحاكاة الصفيحة المربعة الشكل لحساس الضغط السعوي القائم على نظام MEMS. وتمت دراسة ثلاثة أنواع من المواد الغشائية (أكسيد الزنك (ZnO) وكبريتيد الزنك (ZnS) ونتريد الألومنيوم (AlN))، وتم النظر في بارامترات الأداء المختلفة. أظهرت النتائج أن انحراف الصفيحة مرتبط خطياً بالضغط المطبق. أتاحت نتائج هذه الدراسة إمكانية استخدام مواد مختلفة لتطبيقات حساس الضغط السعوي، ومع ذلك، فإن النمذجة الرياضية التفصيلية والمحاكاة التحليلية مع مناقشة واسعة حول الخصائص المختلفة (مثل انحراف الصفيحة، وتغير السعة) لحساسات الضغط السعوية ذات الصفيحة المربعة مثبتة الحواف غير متوفرة في الدراسات السابقة.

## 2- أهمية البحث أهدافه:

تبرز أهمية البحث في الدراسة التفصيلية لنظرية الانحراف ومعادلات الانحناء للصفحة المربعة لحساس الضغط السعودي، وباستخدام طريقة العناصر المنتهية كخيار جديد لنمذجة المعادلات الرياضية الخاصة بانحراف الصفحة، وتتجلى أهمية البحث أيضاً في نمذجة الصفحة المربعة لحساس الضغط السعودي باستخدام MATLAB وطريقة العناصر المنتهية (FEM)، ودراسة تأثير تغيير أبعاد الصفحة على مقدار انحرافها، واعتمدت هذه الدراسة على ثلاثة أنواع من مواد الصفحة (مطاط السليكون، Zinc sulfide, Polydimethylsiloxane) مع الأخذ بالحسبان حالة الحواف المثبتة.

## 3- طرائق البحث ومواده:

يوضح الشكل (1) المخطط الصندوقي لمراحل البحث.



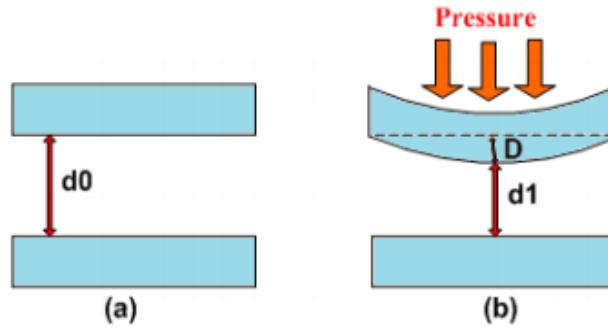
الشكل (1): المخطط الصندوقي لمراحل البحث

### 1-3 مبدأ عمل الحساس:

يتكون الحساس من لوحين (صفيحتين) متوازيين بمساحة متساوية A لتشكيل أقطاب المكثف، مفصولة بمسافة  $d_0$  كما هو موضح في الشكل (2-a). يُعطى النموذج الرياضي للسعة الكهربائية للوحين المتوازيين على النحو الآتي:

$$C_0 = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d_0} \quad (1)$$

حيث  $\epsilon_0$  هي ثابت العازلية للخلاء وتساوي إلى  $8.854 \cdot 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$ ،  $\epsilon_r$  هي السماحية النسبية للمادة العازلة بين أقطاب المكثف، A هي مساحة التداخل بين الصفيحتين ( $\text{m}^2$ )،  $d_0$  هو الفاصل بين الصفيحتين (m). يتم في حساسات الضغط السعوية القائمة على MEMS تغيير 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 (2-b). يؤدي تقليل فجوة الفصل إلى زيادة سعة الحساس حسب حجم الضغط المطبق.



الشكل (2) 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].

### 2-3 الافتراضات الأساسية والمعادلات الرياضية:

#### 1-2-3 نظرية الانحراف Deflection Theory:

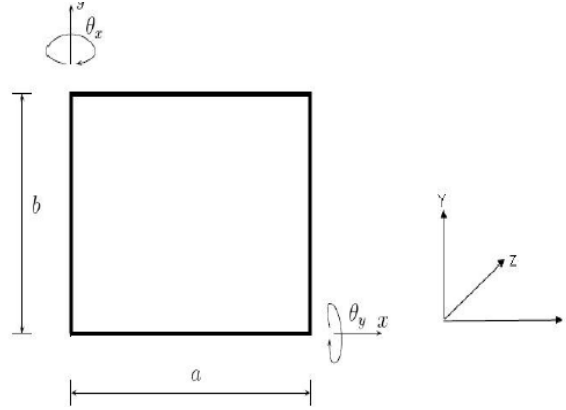
الصفيحة عبارة عن جسم مسطح سمكه أصغر بكثير من أبعاده الأخرى. يؤدي الضغط على الصفيحة إلى انحنائها، ينتج عن ذلك عزم انحناء والتواء. هناك نظريتان معروفتان عن انحناء الصفائح اعتماداً على ما إذا كان التشوه العرضي (transverse shear deformation) يؤخذ في عين الاعتبار أو لا [13]. نظرية Thin plate theory/ Kirchhoff plate theory تقوم بإهمال التشوه العرضي، وأما نظرية Mindlin theory/ Mindlin—Reissner theory فتأخذ التشوه العرضي بعين الاعتبار.

#### 1-1-2-3 نظرية كيرشوف (Kirchhoff plate theory)

في هذه النظرية يتم إهمال التشوه العرضي. يتم التعبير عن الإزاحة بالعلاقات الآتية [13]:

$$u = -z \frac{\partial \omega}{\partial x} \quad v = -z \frac{\partial \omega}{\partial y} \quad w = w(x, y) \quad (2)$$

حيث  $x$  و  $y$  هما المحاور الداخلية الموجودة في المستوى الأوسط من الصفيحة، و  $z$  المحور الموجود على طول سماكة الصفيحة،  $\theta_x$  و  $\theta_y$  زوايا الدوران حول  $X$  و  $Y$  على التوالي، سمك الصفيحة  $t$ ، طول الصفيحة "a" وعرضها "b" كما هو موضح في الشكل (3). وبالتالي فإن  $u$ ،  $v$  هما الإزاحة على طول المحاور  $x$  و  $y$  على التوالي و  $w$  هي الإزاحة العرضية أو الانحراف على طول المحور  $z$ .



الشكل (3): شكل الصفيحة، درجات الحرية

وتعطى التشوهات (strains) بدلالة الإزاحة بالعلاقة الآتية:

$$\varepsilon_x = -z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad \varepsilon_y = -z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \quad \gamma_{xy} = -2z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (3)$$

نظرًا لعدم أخذ التشوه العرضي بالحسبان، يكون لدينا الآتي:

$$\gamma_{yz} = \gamma_{zx} = 0 \quad (4)$$

بالنسبة للصفيحة الرقيقة يعطى الإجهاد (stress) كالاتي:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \end{Bmatrix} = -z \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu \\ \nu & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

$$\tau_{xy} = -2zG \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}$$

حيث:  $E$ : معامل المرونة.

$\nu$ : معامل بواسون.

$G$ : معامل المرونة في القص (shear).

$\tau_{xy}$ : مكون إجهاد القص في إحداثيات مستطيلة.

تؤدي الإجهادات (stress) المذكورة أعلاه إلى ظهور العزوم (moments) التي تعطى بالعلاقات

الآتية:

$$M_x = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_x z dz \quad M_y = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_y z dz \quad M_{xy} = \int_{-t/2}^{t/2} \tau_{xy} z dz \quad (6)$$

وبالتالي فإن علاقة عزوم الانحناء (moment-curvature) للصفحة حسب نظرية كيرشوف هي:

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = D \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\ 2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix} \quad (7)$$

حيث D هي صلابة الانحناء، تعطى بالعلاقة الآتية:  $D = \frac{E.h^3}{12.(1-\nu^2)}$

### 2-1-2-3 نظرية Mindlin plate:

تفترض هذه النظرية أن التشوه العرضي يُأخذ بالحسبان. بالتالي تعطى الإزاحات والتشوهات (strains) كالآتي:

$$u = z\theta_x, \varepsilon_x = z \frac{\partial \theta_y}{\partial x}, \gamma_{xy} = z \left( \frac{\partial \theta_y}{\partial y} - \frac{\partial \theta_x}{\partial x} \right) \quad (8)$$

$$v = -z\theta_x, \varepsilon_y = -z \frac{\partial \theta_x}{\partial y}, \gamma_{yz} = \frac{\partial w}{\partial y} - \theta_x$$

$$\gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial x} + \theta_y$$

وبالتالي فإن علاقة عزوم الانحناء (moment-curvature) والتشوه العرضي تعطى كالآتي:

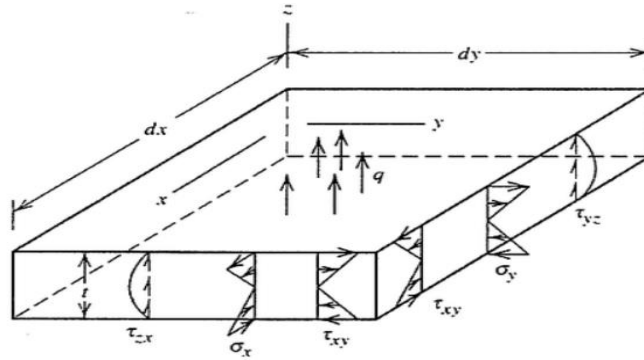
$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = D \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\ 2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix} \quad (9)$$

(10)

$$\begin{Bmatrix} Q_x \\ Q_y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Gt & 0 \\ 0 & Gt \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \gamma_x \\ \gamma_y \end{Bmatrix}$$

حيث  $Q_x, Q_y$  هما القوة المطبقة عرضياً.

يظهر الضغط على المقطع العرضي للوحة في الشكل (4).



الشكل (4): الإجهاد والقوى الجانبية الموزعة على اللوحة

### 3-3 النمذجة الرياضية لانحناء الصفيحة باستخدام طريقة العناصر المنتهية in

#### (FEM) the Finite Element Method

عادةً بالنسبة لمشكلة تحليل الضغط المطبق، نسعى إلى تحديد الإزاحة والضغط في جميع أنحاء الهيكل، والذي يكون في حالة توازن ويخضع لأحمال مطبقة. بالنسبة للعديد من الهياكل، من الصعب تحديد توزيع التشوه باستخدام الطرق التقليدية، وبالتالي يتم استخدام طريقة العناصر المنتهية. تعد طريقة العناصر المنتهية من الطرق المفيدة في حل المسائل المعقدة كما أنها من الطرق التي لاتزال تشهد انتشاراً واسعاً لارتباطها المباشر بالحاسوب وقدرتها على حساب الاجهادات والتشوهات بشكل دقيق في مختلف النقاط المدروسة [14].

تتضمن هذه الطريقة نمذجة الهيكل باستخدام عناصر صغيرة مترابطة تسمى العناصر المنتهية. يرتبط تابع الإزاحة بكل عنصر محدد، ويرتبط كل عنصر بشكل مباشر أو غير مباشر بكل عنصر آخر من خلال واجهات مشتركة، بما في ذلك العقد أو خطوط الحدود أو الأسطح [15]. يوجد مجموعة من الخطوات التي يجب اتباعها لنمذجة الصفيحة المربعة باستخدام تقنية FEM وهي على النحو الآتي:

#### 1. تحديد نوع العنصر (Select Element Type)

نختار لوحة مربعة مقسمة إلى 20\*20 عنصر كما هو موضح بالشكل (5) ولكل عنصر أربع عقد ولكل عقدة 3 درجات من الحرية ، w إزاحة عرضية في اتجاه x,z دوران حول المحور x ، y دوران حول المحور y يتم إعطاء مصفوفة الإزاحة العقدية عند العقدة i كالتالي:

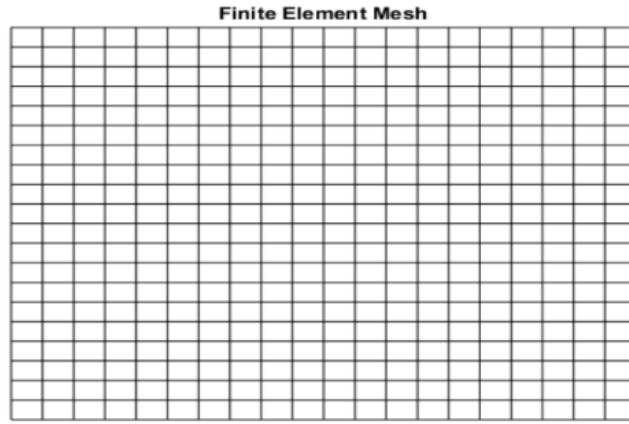
$$\{d_i\} = \begin{Bmatrix} \omega_i \\ \theta_{xi} \\ \theta_{yi} \end{Bmatrix} \quad (11)$$

$$\theta_x = +\frac{\partial \omega}{\partial y}, \theta_y = -\frac{\partial \omega}{\partial x} \quad \text{حيث}$$

يتم إعطاء مصفوفة إزاحة العنصر الإجمالية للعقد الأربعة (i,j,m,n) كالتالي:



$$\{d\} = \{[d_i][d_j][d_m][d_n]\}^T \quad (12)$$



الشكل (5): شبكة العناصر المنتهية 20 \* 20.

## 2. تحديد تابع الازاحة (Select the Displacement Function)

نظرًا لوجود 12 درجة حرية للعنصر degrees of freedom، فإننا نختار كثير الحدود مكون من

12 حد على النحو الآتي:

$$\omega = a_1 + a_2x + a_3y + a_4x^2 + a_5xy + a_6y^2 + a_7x^3 + a_8x^2y + a_9xy^2 + a_{10}y^3 + a_{11}x^3y + a_{12}xy^3 \quad (13)$$

باختصار كثير الحدود السابق وتعويضه بعلاقة الازاحة ينتج الآتي:

$$\omega = a_1 + a_2x + a_4x^2 + a_7x^3$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial x} = a_2 + 2a_4x + 3a_7x^2 \quad (14)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial y} = a_3 + a_5x + a_8x^2 + a_{12}x^3$$

بكتابتها على شكل مصفوفة على النحو الآتي:

$$\begin{Bmatrix} \omega \\ \frac{\partial \omega}{\partial y} \\ -\frac{\partial \omega}{\partial x} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x & y & x^2 & xy & y^2 & x^3 & x^2y & xy^2 & y^3 & x^3y & xy^3 \\ 0 & 0 & +1 & 0 & +x & +2y & 0 & +x^2 & +2xy & +3y^2 & +x & +3xy^2 \\ 0 & -1 & 0 & -2x & -y & 0 & -3x^2 & -2xy & -y^2 & 0 & -3x^2y & -y^3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \\ a_7 \\ a_8 \\ a_9 \\ a_{10} \\ a_{11} \\ a_{12} \end{Bmatrix} \quad (15)$$

يمكن كتابتها بشكل مصفوفة بسيطة على النحو الآتي:

$$\{\psi\} = [P]\{a\} \quad (16)$$

حيث [P] الجزء الأيمن من العلاقة (15).

بالتالي نستطيع كتابة الازاحة بالشكل الآتي:

$$\{d\} = \begin{Bmatrix} \omega_i \\ \theta_{xi} \\ \theta_{yi} \\ \omega_j \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_i & y_i & x_i^2 & x_i y_i & y_i^2 & x_i^3 & +x_i^2 y_i & +x_i y_i^3 & y_i^3 & x_i^3 y_i & x_i y_i^3 \\ 0 & 0 & +1 & 0 & +x_i & 2y_i & 0 & +x_i^2 & +2x_i y_i & 3y_i^2 & x_i^3 & 3x_i y_i^2 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ a_{12} \end{Bmatrix} \quad (17)$$

عليه يكون:

$$\{a\} = [C]^{-1} \{d\} \quad (18)$$

$$\{\psi\} = [p][C]^{-1} \{d\} \quad (19)$$

$$\{\psi\} = [N] \{d\}$$

### 3. تحديد التشوه والضغط والازاحة وعلاقات الانحناء:

نكتب مصفوفة الانحناء للعقد بالشكل الآتي:

$$\{\kappa\} = \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -2a_4 & -6a_7x & -2a_8y & -6a_{11}xy \\ -2a_6 & -2a_9x & -6a_{10}y & -6a_{12}xy \\ -2a_6 & -4a_8x & -4a_9y & -6a_{11}x^2 & -6a_{12}y^2 \end{Bmatrix} \quad (20)$$

يمكن كتابتها بالشكل الآتي:

$$\{\kappa\} = [Q] \{a\} \quad (21)$$

$$\{\kappa\} = [B] \{d\}$$

$$\{B\} = [Q][C]^{-1} \quad (22)$$

تعطي مصفوفة الانحناء اللحظي كالاتي:

$$\{M\} = \begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = [D] \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} = [D] \{B\} \{d\} \quad (23)$$

حيث D المصفوفة المتعلقة بخواص المواد وتعطي بالشكل الآتي:

$$[D] = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (24)$$

4. اشتقاق مصفوفة ومعادلات صلابة العنصر:

يتم إعطاء مصفوفة الصلابة بالشكل الآتي:

$$[k] = \int \int [B]^T [D][B] dx dy \quad (25)$$

يتم الحصول على مصفوفة القوة السطحية الناتجة عن التحميل الموزع q المؤثرة لكل وحدة مساحة في اتجاه z باستخدام المعادلة القياسية الآتية:

$$\{F_s\} = \int \int [N_s]^T q dx dy \quad (26)$$

تكتب بشكل مصفوفة على النحو الآتي:

$$\begin{Bmatrix} f_{oi} \\ f_{\theta xi} \\ f_{\theta yi} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ f_{\theta yn} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{1,1} & K_{1,2} & K_{1,3} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & K_{1,12} \\ K_{2,1} & K_{2,2} & K_{2,3} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & K_{2,12} \\ K_{3,1} & K_{3,2} & K_{3,3} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & K_{3,12} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ K_{12,1} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & K_{12,12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} oi \\ \theta xi \\ \theta yi \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \theta yn \end{Bmatrix} \quad (27)$$

4- المناقشة والنتائج:

يركز هذا العمل على تباين المواد والأبعاد الهندسية انطلاقاً من أهميتها، لكونها تسمح بوجود قفزة نوعية وكمية واضحة في تطور تكنولوجيا الالكترونيات الحديثة [16]، لملاحظة أقصى جهد للثني والانحراف للصفحة. تم تلخيص ثوابت المادة المستخدمة في هذا البحث في الجدول (1)، بينما تم تلخيص البارامترات الأخرى (طول، عرض، سماكة) من أجل العثور على الخاصية الميكانيكية المثلى للصفحة في الجدول (2). تم اختيار مطاط السليكون (Silicone rubber)، Polydimethylsiloxane (PDMS) وكبريتيد الزنك (Zinc sulfide) لدراستها كمادة لصفحة المكثف في هذا العمل. تعتبر البارامترات المتنوعة المختارة ضرورية لدراسة أداء الصفحة المربعة لحساس الضغط في ظروف مختلفة. أجريت الدراسة عند ضغط ثابت 1 باسكال باستخدام MATLAB (R2014a) وبرنامج FEM القياسي لنمذجة الصفحة المربعة.

إنّ دقة النتائج تعتمد على حجم الشبكة المحددة لهذا البحث، حيث تم ضبط حجم الشبكة على 20\*20 مع ملاحظة أنه كلما كان حجم الشبكة أكبر كلما كانت النتيجة أكثر دقة ولكن كلما زاد وقت المحاكاة. كما سنقوم بمقارنة

القيم التي تم الحصول عليها باستخدام الماتلات مع برنامج FEM القياسي بالإضافة لدراسة تأثير نوع المادة المستخدمة في الحصول على أقصى انحراف.

الجدول (1): ثوابت مادة الصفيحة المستخدمة في المحاكاة

المادة	معامل يونغ	معامل بواسون
Silicone rubber	0.05Gpa	0.49
Polydimethylsiloxane	870Kpa	0.5
Zinc sulfide	75Gpa	0.27

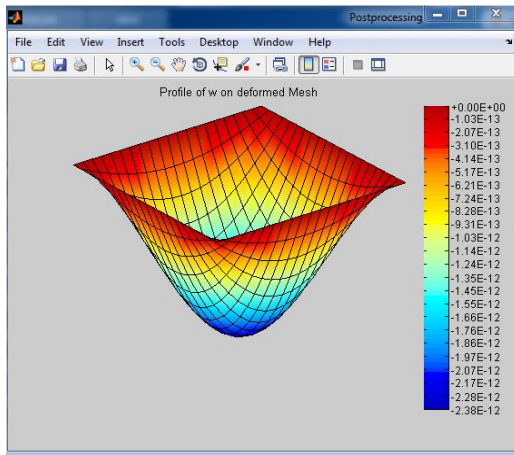
الجدول (2): البارامترات المستخدمة في المحاكاة

المادة	السماكة	الطول	العرض
الحالة الأولى	0.3 $\mu$ m	3 $\mu$ m	3 $\mu$ m
الحالة الثانية	0.2 $\mu$ m	2 $\mu$ m	2 $\mu$ m
الحالة الثالثة	0.1 $\mu$ m	1 $\mu$ m	1 $\mu$ m

#### 1-4 مقدار الانحراف عند استخدام Silicone rubber كمادة للصفحة المربع:

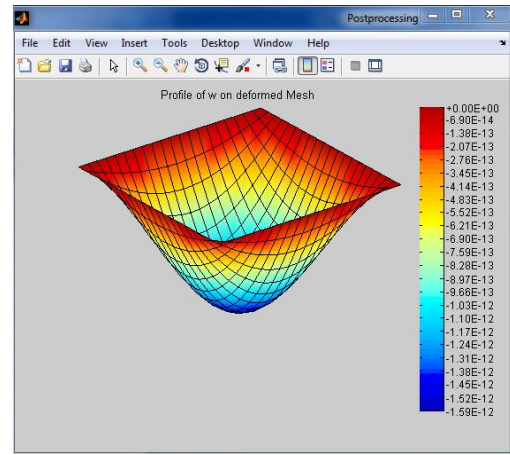
يوضح الشكل (6.a) مقدار الانحراف للصفحة المربعة المصنعة من مطاط السليكون عند ضبط أبعادها على

$3 \mu\text{m} * 3 \mu\text{m}$  وسماكتها على  $0.3 \mu\text{m}$  وذلك عند تطبيق ضغط مقداره  $1 \text{pa}$  ونلاحظ من الشكل أن الانحراف الأعظمي يكون عند مركز الصفحة بقيمة مقدارها  $2.38 * 10^{-12}$ ، كما يوضح الشكل (6.b) مقدار الانحراف للصفحة المربعة المصنعة من مطاط السليكون عند ضبط أبعادها على  $2 \mu\text{m} * 2 \mu\text{m}$  وسماكتها على  $0.2 \mu\text{m}$  وذلك عند تطبيق ضغط مقداره  $1 \text{pa}$  ونلاحظ من الشكل أن الانحراف الأعظمي يكون أيضاً عند مركز الصفحة بقيمة مقدارها  $1.59 * 10^{-12}$ ، ويوضح الشكل (6.c) مقدار الانحراف للصفحة المربعة المصنعة من مطاط السليكون عند ضبط أبعادها على  $1 \mu\text{m} * 1 \mu\text{m}$  وسماكتها على  $0.1 \mu\text{m}$  وذلك عند تطبيق ضغط مقداره  $1 \text{pa}$  ونلاحظ من الشكل أن الانحراف الأعظمي يكون أيضاً عند مركز الصفحة بقيمة مقدارها  $7.93 * 10^{-13}$ ، كما يوضح الجدول (3) مقارنة بين القيم التي تم الحصول عليها باستخدام كود ماتلاب مع برنامج FEM القياسي لإظهار دقة الكود، وأظهرت النتائج ان انحراف صفيحة مطاط السليكون يزداد بازدياد أبعادها، حيث ظهر أقصى أنحراف لمركز الصفحة عند الأبعاد  $3 \mu\text{m} * 3 \mu\text{m}$  وسماكة  $0.3 \mu\text{m}$ .



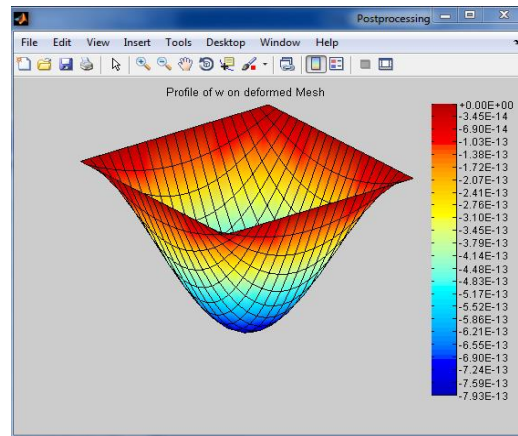
الشكل (6.a): انحراف صفيحة مطاط السليكون ذو الأبعاد

$3 \mu\text{m} * 3 \mu\text{m}$



الشكل (6.b): انحراف صفيحة مطاط السليكون ذو الأبعاد

$2 \mu\text{m} * 2 \mu\text{m}$



الشكل (6.c): انحراف صفيحة مطاط السليكون ذو الأبعاد

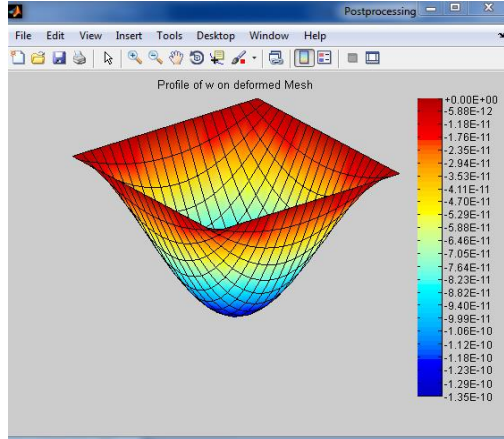
الجدول (3): مقدار انحراف الصفيحة FEM software & MATLAB

الحالات	FEM software	MATLAB
1	$2.38\text{e}-12$	$2.379745162322493\text{e}-12$
2	$1.59\text{e}-12$	$1.586496774882337\text{e}-12$
3	$7.93\text{e}-13$	$7.932483874411687\text{e}-13$

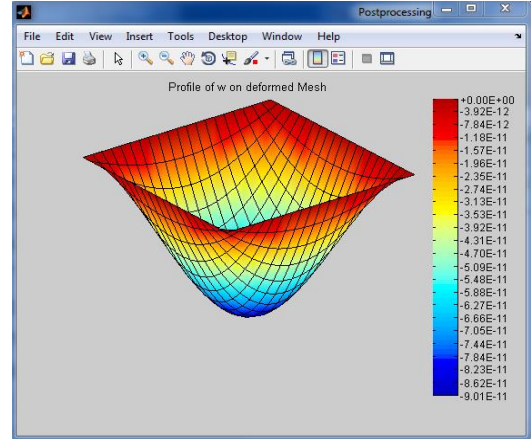
#### 2-4 مقدار الانحراف عند استخدام Polydimethylsiloxane كمادة للصفحة المربع:

يوضح الشكل (7.a) مقدار الانحراف للصفحة المربعة المصنعة من Polydimethylsiloxane عند ضبط أبعادها على  $3 \mu\text{m} * 3 \mu\text{m}$  وسماكتها على  $0.3 \mu\text{m}$  وذلك عند تطبيق ضغط مقداره  $1\text{pa}$  ونلاحظ من الشكل أن الانحراف الأعظمي يكون عند مركز الصفيحة بقيمة مقدارها  $1.35 * 10^{-10}$ ، كما يوضح الشكل (7.b) مقدار الانحراف للصفحة المربعة المصنعة من مطاط السليكون عند ضبط أبعادها على  $2 \mu\text{m} * 2 \mu\text{m}$  وسماكتها على  $0.2 \mu\text{m}$  وذلك عند تطبيق ضغط مقداره  $1\text{pa}$  ونلاحظ من الشكل أن الانحراف الأعظمي يكون أيضاً عند مركز الصفيحة بقيمة مقدارها  $9.01 * 10^{-11}$ ، ويوضح الشكل (7.c) مقدار الانحراف للصفحة المربعة المصنعة من مطاط السليكون عند

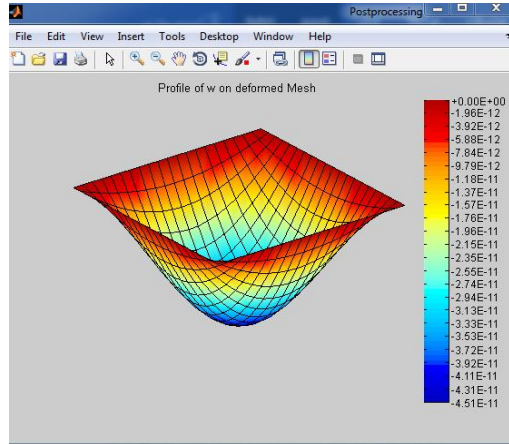
ضبط أبعادها على  $1 \mu\text{m} * 1 \mu\text{m}$  وسماكتها على  $0.1 \mu\text{m}$  وذلك عند تطبيق ضغط مقداره  $1 \text{pa}$  ونلاحظ من الشكل أن الانحراف الأعظمي يكون عند مركز الصفيحة بقيمة مقدارها  $4.51 * 10^{-11}$ . كما ويوضح الجدول (4) مقارنة بين القيم التي تم الحصول عليها باستخدام كود ماتلاب مع برنامج FEM القياسي، لإظهار دقة الكود، وأظهرت النتائج ان انحراف صفيحة ال Polydimethylsiloxane يزداد بازدياد أبعادها، حيث ظهر أقصى أنحراف لمركز الصفيحة عند الأبعاد  $3 \mu\text{m} * 3 \mu\text{m}$  وسماكة  $0.3 \mu\text{m}$ .



الشكل (7.a): انحراف صفيحة Polydimethylsiloxane

ذو الأبعاد  $3 \mu\text{m} * 3 \mu\text{m}$ 

الشكل (7.b): انحراف صفيحة Polydimethylsiloxane

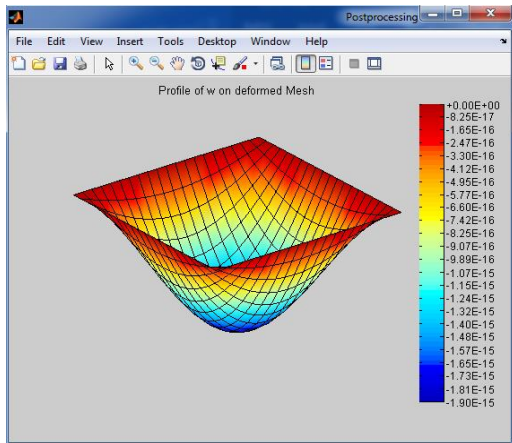
ذو الأبعاد  $2 \mu\text{m} * 2 \mu\text{m}$ الشكل (7.c): انحراف صفيحة Polydimethylsiloxane ذو الأبعاد  $1 \mu\text{m} * 1 \mu\text{m}$ .

الجدول (4): مقدار انحراف الصفيحة FEM software &amp; MATLAB

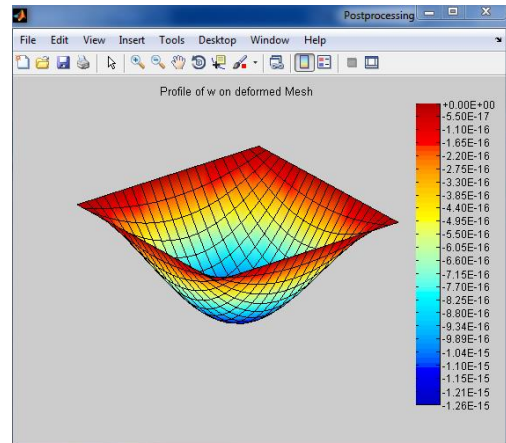
الحالات	FEM software	MATLAB
1	$1.35 \text{e}-10$	$1.351658373535542 \text{e}-10$
2	$9.01 \text{e}-11$	$9.011055823588156 \text{e}-11$
3	$4.51 \text{e}-11$	$4.505527911794078 \text{e}-11$

### 3-4 مقدار الانحراف عند استخدام Zinc sulfide كمادة للصفحة المربع:

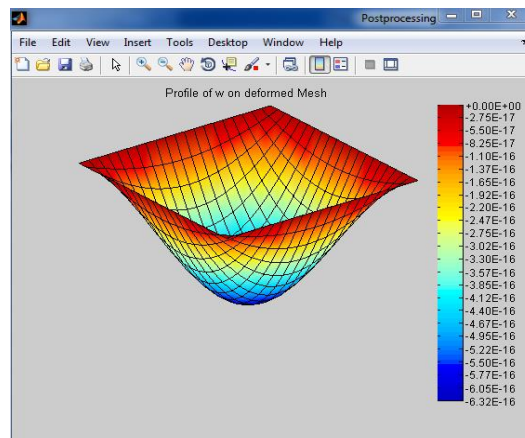
يوضح الشكل (8.a) مقدار الانحراف للصفحة المربعة المصنعة من Zinc sulfide عند ضبط أبعادها على  $3 \mu\text{m} * 3 \mu\text{m}$  وسماكتها على  $0.3 \mu\text{m}$  وذلك عند تطبيق ضغط مقداره  $1 \text{pa}$  ونلاحظ من الشكل أن الانحراف الأعظمي يكون عند مركز الصفحة بقيمة مقدارها  $1.90 * 10^{-15}$ . كما ويوضح الشكل (8.b) مقدار الانحراف للصفحة المربعة المصنعة من مطاط السليكون عند ضبط أبعادها على  $2 \mu\text{m} * 2 \mu\text{m}$  وسماكتها على  $0.2 \mu\text{m}$  وذلك عند تطبيق ضغط مقداره  $1 \text{pa}$  ونلاحظ من الشكل أن الانحراف الأعظمي يكون أيضاً عند مركز الصفحة بقيمة مقدارها  $1.26 * 10^{-15}$ ، ويوضح الشكل (8.c) مقدار الانحراف للصفحة المربعة المصنعة من مطاط السليكون عند ضبط أبعادها على  $1 \mu\text{m} * 1 \mu\text{m}$  وسماكتها على  $0.1 \mu\text{m}$  وذلك عند تطبيق ضغط مقداره  $1 \text{pa}$  ونلاحظ من الشكل أن الانحراف الأعظمي يكون أيضاً عند مركز الصفحة بقيمة مقدارها  $6.32 * 10^{-16}$ . كما يوضح الجدول (5) مقارنة بين القيم التي تم الحصول عليها باستخدام كود ماتلاب مع برنامج FEM القياسي. لإظهار دقة الكود. وأظهرت النتائج ان انحراف صفحة ال Zinc sulfide يزداد بازدياد أبعادها، حيث ظهر أقصى انحراف لمركز الصفحة عند الأبعاد  $3 \mu\text{m} * 3 \mu\text{m}$  وسماكة  $0.3 \mu\text{m}$ .



الشكل (8.a): انحراف صفحة Zinc sulfide ذو الأبعاد  $3 \mu\text{m} * 3 \mu\text{m}$



الشكل (8.b): انحراف صفحة Zinc sulfide ذو الأبعاد  $2 \mu\text{m} * 2 \mu\text{m}$



الشكل (8.c): انحراف صفحة Zinc sulfide ذو الأبعاد  $1 \mu\text{m} * 1 \mu\text{m}$

الجدول (5): مقدار انحراف الصفيحة FEM software &amp; MATLAB

الحالات	FEM software	MATLAB
1	1.90e-15	1.896469243709917e-15
2	1.26e-15	1.264312829143281e-15
3	6.32e-16	6.321564145716404e-16

يوضح الجدول (6) المقارنة بين المواد الثلاثة، نلاحظ أن أقصى انحراف لمركز الصفيحة يظهر عند استخدام مادة Polydimethylsiloxane كمادة للصفيحة يليها مطاط السليكون ومن ثم Zinc sulfide.

الجدول (6): مقارنة بين المواد الثلاثة

المواد	FEM software	MATLAB
Polydimethylsiloxane	1.35e-10	1.351658373535542e-10
مطاط السليكون	2.38e-12	2.379745162322493e-12
Zinc sulfide	1.90e-15	1.896469243709917e-15

## 5- الاستنتاجات والتوصيات:

في هذا البحث، تم عرض الدراسة التفصيلية لنظرية الانحراف ومعادلات الانحناء للصفيحة المربعة لحساس الضغط السعودي. استخدمنا MATLAB لنمذجة انحراف الصفيحة، مما ساعد على فهم نظرية الانحراف المعقدة كما تم أيضاً تحليل خصائص انحراف المركز باستخدام FEM CAD. حيث تم النظر في ثلاثة أنواع من المواد: Polydimethylsiloxane و Zinc sulfide ومطاط السليكون. أظهرت النتائج أن الانحراف يزداد بازدياد أبعاد الصفيحة. من بين المواد الثلاثة التي تم دراستها، أظهر صفيحة Polydimethylsiloxane انحرافاً أعلى عند مقارنتها بصفيحة مطاط السليكون و Zinc sulfide. تمت مقارنة نتائج المحاكاة لأداة MATLAB و FEM وأظهرت القيم المقاسة توافقاً جيداً. وكدراسات مستقبلية نوصي بالآتي:

- 1- دراسة تأثير تغير الضغط المطبق على أنحراف الصفيحة والذي يعد مهم في هذا الجانب.
- 2- دراسة تأثير درجة الحرارة على مقدار الانحراف الذي تحققه كل مادة.



## المراجع العلمية:

- [1] ننتيفة، رولا؛ أحمد، أريانه؛ السويحة، ريماز. (2020)، تأثير استخدام تقنية النانو على المباني المعاصرة. مجلة جامعة طرطوس للدراسات والبحوث العلمية \_ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (4) العدد (7) .
- [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] عفيفه،كمال؛ صبيح،محمد؛ خيجة،ربى. (2019)،تحسين أداء خوارزمية SIMULATED ANNALING من أجل تحسين تموضع البلوكات ضمن شريحة FPGA . مجلة جامعة طرطوس للدراسات والبحوث العلمية \_ سلسلة العلوم الأساسية المجلد (3) العدد (4).
- [4] A. M. Hussain and M. M. Hussain, "Deterministic Integration of Outof-Plane Sensor Arrays for Flexible Electronic Applications," Small, vol. 12, no. 37, pp. 5141-5145, 2016.
- [5] S. S. Kumar, and B. D. Pant, "Design principles and considerations for the 'ideal' silicon piezoresistive pressure sensor: a focused review", Microsyst. Technol., vol. 20, no. 7, pp. 1213-1247, 2014.
- [6] A. E. Kubba, A. Hasson, A. I. Kubba, and G. Hall, "A micro-capacitive pressure sensor design and modelling," J. Sen. Syns. Syst., vol. 5, pp. 95-112, 2016.
- [7] Khakpour, Reza, Solmaz RM Mansouri, and A. R. Bahadorimehr. "Analytical comparison for square, rectangular and circular diaphragms in MEMS applications." 2010 International Conference on Electronic Devices, Systems and Applications. IEEE, 2010.
- [8] مخول، مخائيل؛ خضور، علي؛ يوسف، جاسم. (2017)، كشف وتشخيص أعطال نظام طاقة كهروشمسي مستقل ونمذجته باستخدام Matlab. مجلة جامعة طرطوس للدراسات والبحوث العلمية \_ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (1) العدد (1) .
- [9] Mishra, Rishabh Bhooshan, and S. Santosh Kumar. "Mathematical modelling and comparative study of elliptical and circular capacitive pressure microsensor." Journal of Physics: Conference Series. Vol. 1240. No. 1. IOP Publishing, 2019.
- [10] Eswaran, Parthasarathy, and S. Malarvizhi. "Microcapacitive Differential Pressure Sensor diaphragm modeling using MATLAB." 2013 International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies (ICCPCT). IEEE, 2013.
- [11] 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).
- [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] Jia, L., Zhang, L., Guo, J., Yao, K., & He, S. (2018). Displacement and Stress Analysis of Thin Plate for Cement Concrete Pavement. Mathematical Problems in Engineering, 2018.
- [14] عمران، منذر. (2003)، دراسة مسألة الدفع الجانبي للتربة المفككة على الجدران الاستنادية بمساعدة طريقة العناصر المحددة. مجلة جامعة تشرين للدراسات والبحوث العلمية \_ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (25) العدد (13) .
- [15] Logan, Daryl L. A first course in the finite element method. Cengage Learning, 2011.
- [16] شعبان، نزار؛ نور الدين، صلاح الدين . (2018)، الخصائص البصرية لرقائق بلورات أحادية من السليكون. مجلة جامعة طرطوس للدراسات والبحوث العلمية \_ سلسلة العلوم الأساسية المجلد (2) العدد (3,2,1) .