

## النموذج الأصلي للجهاز الرنّان (المرنان) الثنائي الأبعاد المصمّم على أساس معدات مقياس خشونة السطح

الدكتور محمد زهرة\*

تاريخ الإيداع 18 / 3 / 2012. قُبل للنشر في 13 / 5 / 2012

### □ ملخص □

نقدم في هذا البحث نموذجاً للمرنان الثنائي الأبعاد البسيط، والمصمّم على أساس معدات مقياس خشونة السطح. إن هذا الجهاز يزودنا بمعلومات مفيدة عن الأسطح الهندسية مثل: الاختلافات في الارتفاعات، واكتشاف نقطة الحافة، والتغيّرات في بعض خواص الأسطح، وعلى نحو رئيسي معاملو المرونة والكثافة. ويتم ذلك باستخدام مسبار (مجس) مصمّم بالأصل كحساس تشابهي عالي التحسس من أجل آلات قياس الإحداثيات، وفي هذا التصميم يُستخدم مسبار المرنان لمراقبة قوى التماس بين المرقم (قلم التسجيل) وسطح العينة على طول المحور Z، ويعطي إشارة خطأ تغذية خلفية إلى مترجم كهروإجهادي رقمي (DPT)، الذي بدوره يُستخدم للتحكّم بالإزاحة العمودية للمسبار بدقة نانومترية. وقد تم إجراء المسح أو الفحص الدقيق للعينة تحت المسبار باستخدام بوليمر ذي درجة حرية أو طلاقة واحدة عالي الدقة يحمل منزلقات (ذو مسارات انزلاقية) تتم مراقبتها بواسطة نظام قياس التداخل الليزري. ومع تحرك العينة جيئةً وذهاباً " يستشعر " المسبار قوة التلامس، ويتحرك نحو الأعلى والأسفل للحفاظ على قوة تلامس ثابتة. واستخدمت كذلك عينات اختبار ابتداءً من طبقات معدنية رقيقة إلى أسطح زجاجية مسطحة، وذلك من أجل إظهار قدرة الجهاز على القياس.

الكلمات المفتاحية: النموذج الأصلي - التصميم الرياضي، مقياس خشونة السطح، المرنان - مسبار - منظم PID - مترجم كهروإجهادي رقمي DPT - أسطح مسطحة - قوة التلامس - القياس.

\* أستاذ مساعد في قسم هندسة التصميم والإنتاج - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية بجامعة تشرين .

## The Original Model for The 2- Dimensional Resonator, Designed on Base Profilometer Instruments

\*Dr. Mohamad Zahra

(Received 18 / 3 / 2011. Accepted 13 / 5 / 2012)

### □ ABSTRACT □

In our present work, we designed a simple 2- Dimensional Resonator Model, on Base Profilometer (Roughness Surface Measurement) instruments. This apparatus gives us good information about the engineering surfaces such as height variations, edge point detection and surface variation characteristics, mainly the density and elastic modulus. This can be done using an Analogue Touch sensitive Sensor for Coordinate Measuring Machines. And in this design the Resonator probe is used to watch the Tangent Force between the Recording Pen ( Stylus) and the Sample Surface along the z- Axis. This gives a feed-back signal to a Digital Piezoelectric Translator (DPT), which in turn is used to control the vertical displacement of the probe at nanometer resolution. Scanning of samples was done under that probe, using a polymer of high precision and single degree of freedom and having slideways that can be watched by a laser interferometer system. By a reverse movement the probe can record the tangent force and move up-down to keep that constant force. Testing these samples was used from thin- metallic- layer to flat glass-surfaces for showing the apparatus measurement power.

**Keywords:** Original Model, Mathematical Design, Profilometer (Roughness Surface Measurement), Resonator, probe, Regulator PID, Digital Piezoelectric Translator (DPT), Flat surfaces, Tangent Force, measurement.

---

\*Assistant Professor in Production and Design Engineering      Department- Faculty of Mech .&  
.Elect .Eng –Tishreen University.

**مقدمة:**

تم استخدام مسابرة (مجسات) المرنان لعقود عدّة من الزمن في مجال واسع من الاستعمالات، والتي تطلبت استخدام حساسات عالية الدقة. وتتضمن هذه الحساسات قياس الكثافة ولزوجة السائل أو الغاز، ومستوى السائل، والكتلة، والتوازن الميكروي [1]، [2]. وقد كانت أيضاً شائعة جداً في تصميم مسبار مجهر المسح أو الفحص الدقيق [3]. إن مبدأ عمل هذه الحساسات يعتمد في الحقيقة على أنه عندما يصبح عنصراً ميكانيكياً متذبذباً عند أحد ترددي الرنين وعلى تلامس أو وشيك مع جسم آخر فإنه يبدل صلابة أو كتلة أو شكل المرنان وبالتالي يسبب تغيرات في ترددات المرنان. ويمكن الكشف عن هذا من خلال مراقبة طور أو سعة أو إعاقة الإشارة. إن هذه الحساسات مصممة بحيث يكون التردد الطبيعي للمرنان تابع للكمية المقاسة.

نقدم في هذا البحث التصميم البسيط ونتائج جهاز قياس خشونة السطح والمسمى بالمرنان باستخدام مسبار مصمم بالأصل كحساس تشابهي عالي التحسس [4]، وذلك من أجل آلات قياس الإحداثيات [5]. في هذا التصميم يتذبذب (بنوس) مسبار المرنان باستخدام زوج من الصفائح الكهروإجهادية PZT، إحدى هذه الصفائح للتشغيل، والصفحة الأخرى لالتقاط إشارة الانفعال المتولدة. يتم إدخال هذه الإشارة في دائرة تشابهيّة ذات حلقة طور مغلقة (PLL)، التي تقود وتكشف التبدل في تردد الرنين. في هذا الاستعمال، يُستخدم المسبار كجهاز تصفير في نظام ذي دائرة مغلقة أو حلقة مغلقة لقياس مجال من الطبقات السفلية المختلفة ذات خواص مواد مختلفة. إن إشارة حلقة الطور المغلقة (PLL) بعد تمريرها عبر منظم تناسبي- تكاملي- تفاضلي (PID) يتم تضخيمها على نحو ملائم واستخدامها كإشارة خطأ لدائرة (حلقة) مغلقة لتلقي مترجم كهروإجهادي رقمي (DPT)، والذي بدوره يُستخدم للتحكم بالإزاحة العمودية للمسبار بدقة نانومترية. يتم استخدام مرقم برأس ألماس 2 ميكرومتر. وقد تم تحريك العينة تحت المسبار باستخدام بوليمر ذو درجة حرية أو طلاقة واحدة عالي الدقة يحمل منزلقات. عند إجراء المسح (الفحص الدقيق) للعينة، يستشعر المسبار بقوة التلامس، ويتحرك نحو الأعلى والأسفل من أجل الحفاظ على قوة ثابتة عند المرقم / سطح التماس للعينة. تم استخدام الإزاحة العمودية لتأمين الارتفاع واكتشاف نقطة الحافة والتغيرات في خواص السطح. لقد وجدت آثار (علامات) المرنان بشكل معقول على أسطح متعددة مسطحة (مفلطحة). وعندما جرت مقارنة هذه الآثار، مع آثار مشابهة تم الحصول عليها باستخدام أجهز أخرى مثل مؤشر معدات قياس السطح لجهاز تايلور هوبسون (Taylor Hobson Talystep)، كان من الواضح وجود فروقات ملحوظة بين كلتا القراءتين، وخاصة عندما تمت مقارنة مواد مختلفة أثناء عملية المسح. وهذا ما حثّ على المزيد من الاستقصاء الشامل في آلية التلامس بين المسبار وسطح العينة [6].

**هدف البحث وأهميته:**

إن الهدف الأساس من البحث هو تصميم نموذج أصلي للجهاز الرنان (المرنان) باستخدام حساس مسبار عالي الدقة مؤلف من عتبة كابولية تهتز بشكل طولاني، وتكمن أهمية البحث في الحصول على معلومات هامة ومفيدة عن أسطح التلامس الهندسية مثل: الاختلافات في الارتفاعات، واكتشاف نقطة الحافة (أي الانتقال بين سطحين)، والتغيرات في بعض خواص الأسطح، وبشكل رئيس معامل المرونة والكثافة. ولتحقيق هذا الهدف تم إيجاد طريقة رياضية لتصميم الجهاز.

## طرائق البحث ومواده:

إن طريقة البحث ومواده تعتمد على معرفة التأثير المتبادل (التفاعل) بين المسبار التذبذبي المستخدم في المرنان وأسطح التلامس، الذي يمكن نمذجته (تشكيله وفقاً لنموذج معين) كمولد ذبذبات بسيط بطول  $l$ ، مع شروط محيطية بإضافة كتلة  $m_e$ ، وصلابة  $k_e$  وتخمد  $h_e$  عند الطرف الحر، وذلك بتطبيق طريقة رالي التقريبية. وكذلك إجراء عمليات اختبار للحصول على خواص الأسطح المستخدمة، التي يتم تسجيلها على حاسب عن طريق لوح اكتساب بيانات ADC. وفي الوقت نفسه، يتم تسجيل القراءات باستخدام نظام مقياس التداخل الليزري عن طريق سطح بيني نظامي RS232. ويتم تسجيل هذه البيانات وتحليلها باستخدام برامج التطبيق LabView (برامج اختبار لمعدات عالمية)، ومجموعات برمجيات إكسل. بالإضافة إلى الاعتماد على مراجع علمية متخصصة، وبحوث علمية منشورة في مجلات عالمية في هذا المجال.

## النتائج والمناقشة:

### 1- نظرية الجهاز وتصميمه (المرنان):

لقد تمت الدراسة والاستقصاء التجريبي لهذه الجهاز باستخدام حساس مسبار مؤلف من عتبة كابولية (كمرة كابولية) تهتز بشكل طولاني. ومن أجل هذا النظام، تم إعطاء ترددات الرنين لمسبار غير محمل (لا يوجد تلامس) وفق ما يأتي [7]:

$$\omega_i = \frac{(2i-1)\pi}{2l} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1)$$

$$i = (1, 2, 3, \dots)$$

إذ  $E$  معامل يونج و  $\rho$  الكثافة و  $l$  هو طول المسبار.

وهو ما فإن أية تغيرات في القوى عند طرف المسبار سوف تؤثر على الصفات الديناميكية للنظام وبالتالي في ترددات الرنين فيه. إن التأثير المتبادل (التفاعل) بين مسبار تذبذبي وأسطح التلامس يمكن نمذجته [8], [9] (تشكيله وفقاً لنموذج معين) كمولد ذبذبات بسيط بطول  $l$ ، مع شروط محيطية بإضافة كتلة  $m_e$ ، وصلابة  $k_e$  وتخمد  $h_e$  عند الطرف الحر. وبتطبيق طريقة رالي التقريبية، من الممكن استخراج أو تشكيل نموذج بسيط من المرتبة الثانية ذي تردد طبيعي معطى وفق ما يأتي:

$$\omega_n \approx \sqrt{\frac{k_c + k_e}{M + \frac{m_e}{3}}} \quad (2)$$

إذ  $k_e$  و  $m_e$  قيم معطاة حسب [10] وهي كما يلي:

$$K_e = (6E^2 P_o R)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

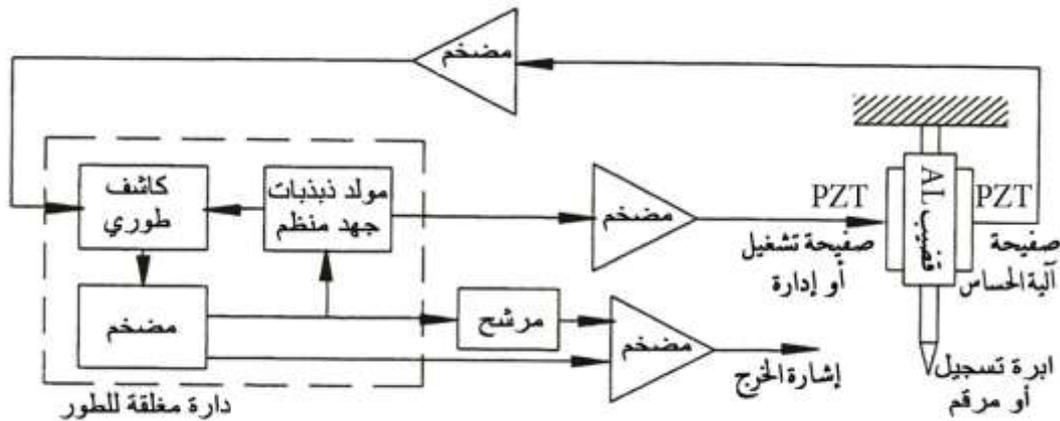
$$m_e \approx \frac{\pi^2 p_o R}{2E} (1 - \nu^2) \rho \quad (4)$$

تبيّن العلاقات أعلاه أن تردد الرنين يعتمد على الحمل الطبيعي  $p_o$  ، ومعامل المرونة  $E$  ، ونسبة بواسون  $U$  والكثافة  $\rho$  لنصف قطر مسبار معطى .

يتألف مسبار جهاز قياس خشونة السطح المستخدم من قضيب ألومنيوم ذي أبعاد متعامدة (5×5×10 مم) يتذبذب باستخدام زوج من الصفائح الكهروإجهادية PZT ، تستخدم إحدى هذه الصفائح لتشغيل المحرك، والأخرى لآلية حساس الالتقاط ، مثبتة على الجوانب المقابلة للعتبة (الكرة) . ويتألف المسبار نفسه من مرقم برأس ألماس 2 ميكرومتر نظامي مثبت ببرغي على الطرف الحر للقضيب .

وبالرغم من أن تردد رنين الجهاز يعتمد بشدة على ترتيب تركيبه ، إلا أنه نموذجي في منطقة التردد 18,5 هرتز مع خاصية سلوكية لنظام من المرتبة الثانية . تُستخدم دائرة متكاملة NE 565 تشابهية ذات حلقة طور مغلقة (PLL) من أجل تذبذب المسبار عند أحد ترددات الرنين فيه، ومراقبة تبدل التردد نتيجة اختلافات القوة بين سطحي التماس .

وبيّن الشكل (1) المخطط الصندوقي لنظام التحكم بمسبار المرنان .



الشكل (1) المخطط الصندوقي لنظام التحكم بالمرنان (الرسم يشير إلى عناصر مسبار المرنان) .

إن تبدل الطور بين التشغيل وإشارة الانفعال معياراً بحوالي ( - 90 ° ) في أثناء إجراء التجارب. عندما يحدث تلامس (أو تلامس وشيك) ، فإن التغيرات في تردد الرنين تبدل زاوية الطور من قيمتها المعيرة مسبقاً. مباشرة بشكل فوري ، تقوم تقنيات دائرة (حلقة) الطور المغلقة (PLL) بتعديل تردد إشارة التشغيل من أجل جعل التغير في زاوية الطور صفراً، وإعطاء إشارة خرج نسبية بمعدل تحوّل قدره 0.73 ميلي فولت هرتز<sup>-1</sup> (0.73mVHz<sup>-1</sup>) .  
و يبيّن الشكل (2) خاصية التلامس النموذجية لمسبار على سطح ألومنيوم نظيف [2] .



تم الكشف عن هذا التبدل بواسطة دارة طور مغلقة (PLL) التي تعطي أو تنتج جهد خرج ، بعد أن يتم تصفيتهما وتضخيمهما، هذا الخرج متناسب مع مقاطع السطح والتغيرات في بعض خواصه الفيزيائية . يتم تلقيم هذه الإشارة من خلال منظم تناسبي- تكاملي- تفاضلي (PID) إلى سيرفو تحكّم بالمحور Z. إن الغاية من دارة التغذية الخلفية (الراجعة) هي الحفاظ على قوة سطحي التماس فيما بين رأس المرقم والعينة بمستوى ثابت تماماً ( القوة الساكنة المعيرة ) .

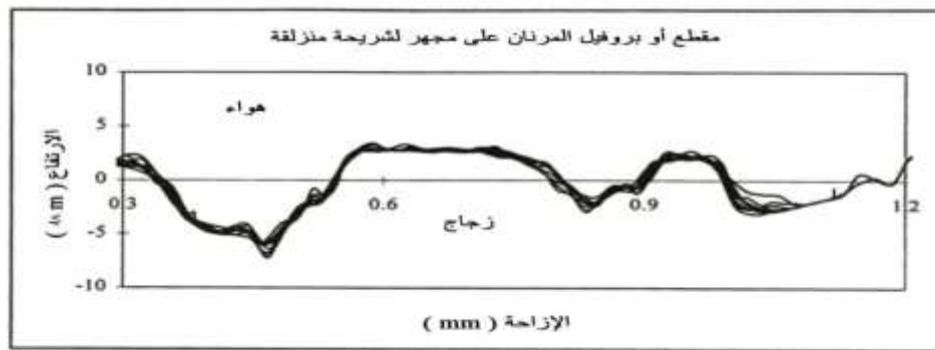
وتم إجراء مسح للعينات تحت المسبار باستخدام بوليمر زجاج السيراميك ( صفر التوسع ) وعالي الدقة يحمل منزلقاً (نو مسار انزلاقي) . يتم تحريك العربة بواسطة محرك تيار مستمر عن طريق نظام نقل حركة مؤلف من مقياس ميكرومتر وقارئة وصل تخلفية ( الاثر بعد زوال المسبب). ويتم مراقبة الإزاحة الأفقية للعربة باستخدام نظام مقياس التداخل الليزري [11].

من أجل الحصول على أثر للسطح، يتم أولاً وضع العينة على نحو آمن على عربة ألمنيوم، ومن ثم يتم وضعها على صف بشكل متوازٍ مع سطح المنزلق باستخدام آلية (ميكانيزم) تعديل زاوي ملحقة (موصولة) بالعربة [12]. ومن ثم يتم وضع المسبار على تلامس وشيك مع السطح إلى أن يقوم خرج دارة الطور المغلقة (PLL) بتسجيل قيمة تتوافق مع القوة الساكنة (الستاتيكية)، نصف مجال المسبار، ويتم إغلاق دارة التحكّم عند هذه النقطة. ومع تحريك العينة جيئةً وذهاباً بسرعة 1 مم/ثانية تقريباً، فإن إشارات الخطأ التناسبية -التكاملية -التفاضلية (PID) تلقّم المترجم الكهروإجهادي الرقمي (DPT).

من أجل تصحيح أية تغيرات في الارتفاع/الخواص، ويتم تسجيلها على حاسب عن طريق لوح اكتساب بيانات ADC. وفي الوقت نفسه ، يتم تسجيل قراءة نظام مقياس التداخل الليزري عن طريق سطح بيني RS232 نظامي. وقد تم تسجيل البيانات وتحليلها باستخدام برامج التطبيق LabView (برامج اختبار لمعدات عالمية) ومجموعات برمجيات إكسل .

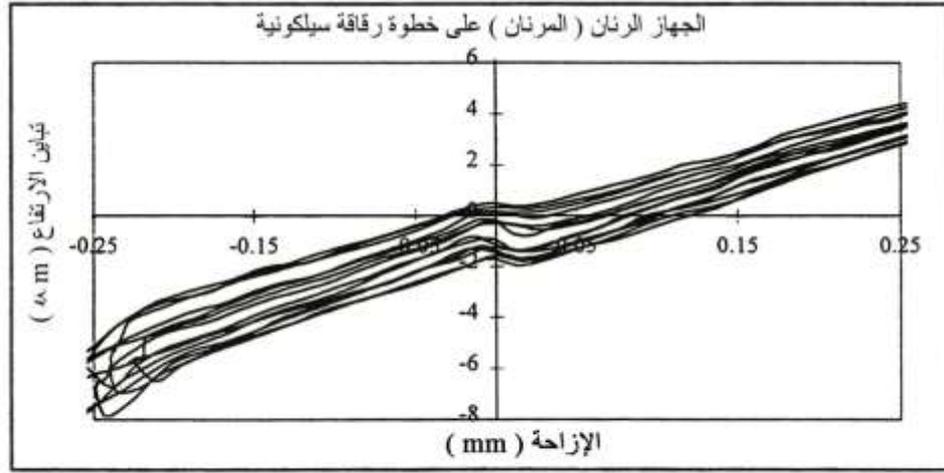
## 2- أداء المرنان وتحليل النتائج:

تم اختبار الأثار ( العلامات) وتحليلها على أسطح هندسية مسطحة بشكل معقول، ابتداءً من الصخور البركانية ومركبات الفولاذ إلى أسطح الزجاج المسطح والسيلكون، وبعض منها مطلي جزئياً بالألمنيوم والذهب .  
يبين الشكل (4) بروفييل أو مقطع لمرنان نموذجي على سطح زجاجي مخدوش لشريحة منزلقة فوق مجهر . لقد تم في هذا الاختبار تسجيل ما يزيد عن 8 أثار في اتجاه واحد على الخط نفسه، وكما هو مبين من الشكل، فإن النتائج متناسقة ومتطابقة تماماً.



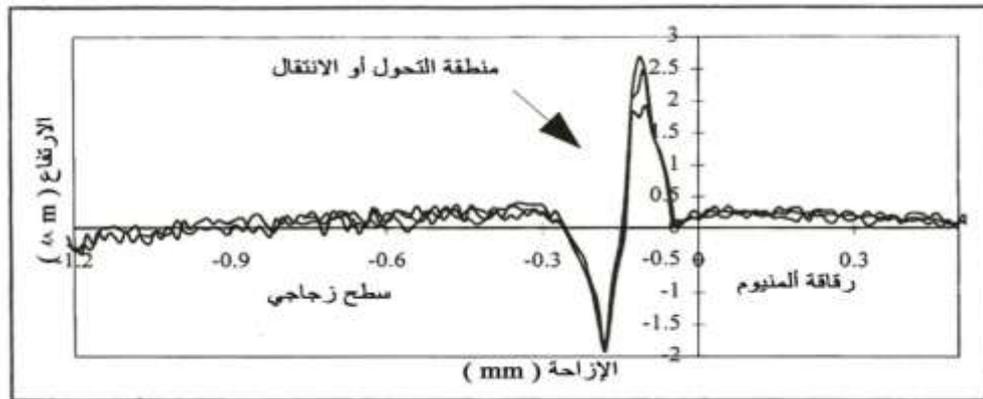
الشكل (4) يبين آثار نموذجية على سطح زجاجي مخدوش لشريحة منزلقة فوق مجهر.

وتم إجراء اختبار مشابه على رقاقة سيلكون محفورة بخطوة ارتفاع 100 نانومتر. كما هو مبين في الشكل (5)، حيث يبين تكرار القياس، اظهر المزايا نفسها، وكذلك ارتفاع الخطوة المُقاسة قريباً جداً من القيمة المتوقعة .



الشكل (5) مقطع مرنان نموذجي على ارتفاع خطوة لرقاقة سيلكون .

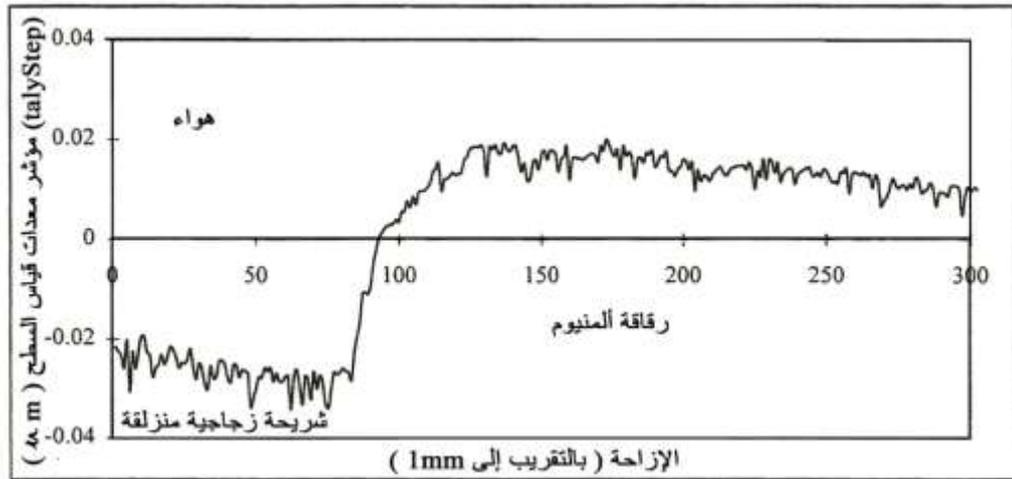
ويبين الشكل (6) بروفيلات أو مقاطع نموذجية لمرنان على شريحة مجهر مطلية على نحو جزئي بطبقة رقيقة من الألمنيوم، ويحدود 50 نانومتر. في هذه الآثار، يبدأ القياس عندما يكون المسبار على تلامس مع سطح الزجاج ويتحرك جيئةً وذهاباً ليجتاز طبقة الألمنيوم ومن ثم يتحرك رجوعاً جيئةً وذهاباً إلى نقطة البداية . تم تسجيل القراءات على سطح الزجاج وطبقة الألمنيوم وعند منطقة الانتقال. حسبما هو مبين في الشكل (6)، فإن تكرار الحركة نفسها جيئةً وذهاباً أعطى مقاطع مشابهة جداً مما يشير إلى التناسق في القياس. إلا أن النقطة المثيرة للاهتمام، التي يمكن الاستدلال عليها من هذه الآثار هي سلوك المسبار عندما يواجه أسطح مختلفة. فعند منطقة الاجتياز (الانتقال) يُظهر المسبار تغيرات سريعة والتي هي بالتأكيد لا تتوافق مع تغيرات الارتفاع الفعلية لكنها من المحتمل أكثر أن تكون بسبب تغيرات مفاجئة في الخواص الفيزيائية، التي تجبر أداة التحكم على أن تُبالغ في إزاحات ارتفاع المسبار إلى حوالي 4.5 ميكرومتر، وذلك من أجل التعويض عن هذه التغيرات .



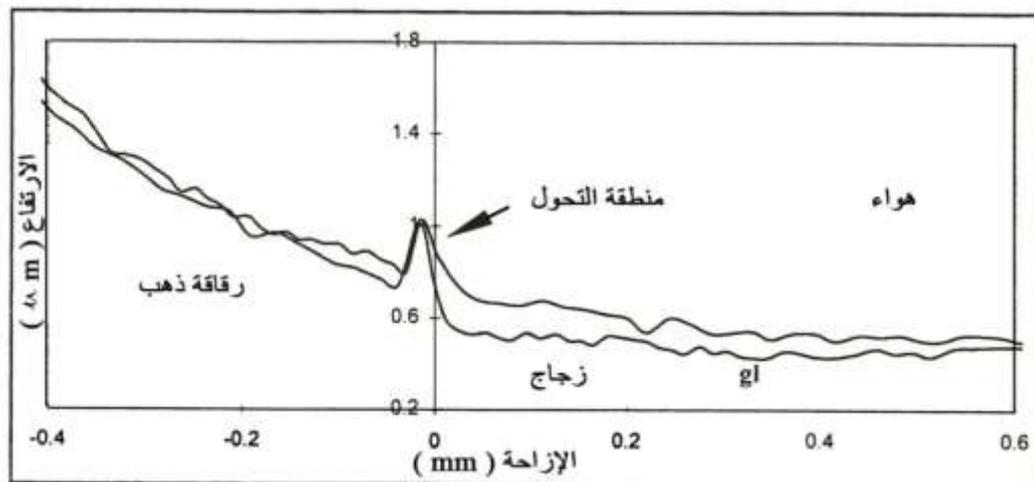
الشكل (6) مقاطع لشريحة على مجهر مطلية بشكل جزئي بطبقة ألمنيوم 50 نانومتر .

وبعد أن يجتاز المسبار المنطقة بشكل كامل، تستقر أداة التحكم، ويمكن أن تُعزى هذه التغيرات في المقطع (منطقة التحول) بشكل رئيس إلى طبوغرافية السطح .

وبمقارنة هذه التغيرات مع آثار مشابهة تم الحصول عليها باستخدام أداة قياس سطح من نوع مرقم (Talystep) ، كما هو موضح على الشكل (7) الذي يظهر أن الانتقال بين الأسطح هو بشكل أكثر نعومة (هدوء). وعلى الرغم من ذلك، فإن حجم (مقدار) الطبقة المُقاس بواسطة كلتا الأداةين (الجهازين) لم يكن متباعدًا، مع الأخذ في الحسبان أنه لم يتم تعبير جهاز Talystep، ولا جهاز قياس خشونة السطح (المرنان) بشكل موثوق قبل هذه الاختبارات .



الشكل (7) آثار (نتائج) مؤشر معدات قياس السطح Talystep على العينة نفسها المختبرة في الشكل (5) السابق . تم تكرار آثار مشابهة على شريحة مجهر مطلية بطبقة من الذهب بحدود 100 نانومتر، كما هو مبين على الشكل (8)، إذ تمت ملاحظة النتيجة نفسها مما يشير بوضوح إلى منطقة الانتقال بين الأسطح. إلا أن حجم (مطال) القفزات كان أقل وضوحاً، وحوالي 0.5 ميكرومتر، بالمقارنة مع سابقتها في الشكل (6) .



الشكل (8) مقطع مرنان على طبقة 100 نانومتر من الذهب فوق سطح زجاجي .

## الاستنتاجات والتوصيات:

### الاستنتاجات:

1. تم تصميم نموذج أصلي لجهاز قياس خشونة السطح واختباره وهو الجهاز الرنان (المرنان).
2. تم تسجيل آثار المرنان في أسطح هندسية مسطحة مختلفة بشكل معقول جداً .
3. أظهرت النتائج تجاوب المسبار مع تغيرات الارتفاع (طبوغرافية السطح ) وتغيرات خواص الأسطح، إذ إن التغير في معامل يونج والكثافة ذو أهمية خاصة، وكان هذا واضحاً عندما تم إجراء مسح لأسطح متعددة
4. أظهرت الأداة (الجهاز) حساسية عالية في اكتشاف نقطة الحافة (أي الانتقال بين سطحين).

### التوصيات:

لا بد من إجراء المزيد من البحث والعمل مستقبلاً من أجل إيجاد طريقه لتوسيع التصميم إلى تصوير سطح ثلاثي الأبعاد، وليكون قادراً على ربط المقاطع الناشئة مع بعض خواص الأسطح المفيدة. إلا أن هذا يمكن أن يتطلب دمج هذه الأداة مع جهاز قياس بمرقم تقليدي من أجل تمييز طبوغرافية الأسطح عن الخواص الفيزيائية الهامة .

## المراجع

1. Eroll P. Cernisse, Robert B. Wiggins,. Review of Thickness- Shear Mode Quartz Resonator Sensors for Temperature and Pressure. Sensors Journal, TEEE, Salt Lake City, USA, V1, 2001, pp79-87.
2. Harb, S.M., Vidic, M. Resonator- Based Touch- Sensitive- Probe. Sensors and Actuators A, Elsevier B.V. UK, V50, 2000, pp23-29.
3. Aaron Schwienberg, Sandinne Hocdi, Neck N. Lepeskin, Robert W. Boyd, Chnistopher Chase, Julie Fajardo,. An Environmental Sensor Based On an Integrated Optical Whispering Gallery Mode Disk Resonator. the Institute of Optics, University of Rochester, USA, V123, 2007, pp727-732.
4. Artur Graziano, Tonyl Schometz,. Sensor Design and Evolution for on- Machine Probing of Extruded Tool Joints, Machine Tool Reserch Center, Precision Engineering, University of Florida, USA, V35, 2011, pp525-535.
5. Paulo H. Reveira,. Coordinate Measuring Machine and System. ISBN: 978-1-57444 – 5652 -4, CRC 2011, 574p.
6. Yasinobe Murayama, Chrestos E. Constantinou, Sadao,. Development of Tactile Mapping System for The Stiffness Characteryzation of Tissue Slice Using Novele Tactile Sensing Technology. Sensors and Actuators A, College Engineering, Nihon University, Fukushima, Japan, V120, 2005, pp543-549.
7. Smith, N. T., Chetwynd, D. G., Foundation of Ultra precision Mechanism Design. Gordon and Breach, Rochester , New York, 2001
8. Charles M. Close, Dean K. Frederick, Jonathan C. Newell, Modeling and Analysis of Dynamic System. Willy, Three Edition, 2010, 592p.
9. Bernd Bauman, Bernd Kost, Marcous Wolff and Henrich Groning,. Modeling and Numerical Investigation of Photoacoustic Resonator. Physical Science, Engineering and Technology, Intych, 2008, 490p.
10. vidic, M., Harb, S. M., and Smith, S. T. Observation of Contact Measurements Using a Resonance Based Touch Sensor. Precision Engineering, V22, 1998, pp19-36.

11. O. Nakamura, M. Goto, K. Toyoda, Y. Tanimura, T. Korosawa, K. Uehara,. Development of a Coordinate Measuring System Tracking Laser Interferometers. CIRP Annals- Manufacturing Technology, National Research Laboratory of Metalurgy ,Tokyo Seimistu Co/ Japan, V40, 2008, pp523-525.
12. Takaaki Oiwa., Precision Mechanism Parallel Kinematics. Department of Mechanical Engineering, Shizuoka University, Japan, V4, 2010, pp326-337.