

دراسة تأثير شكل المقطع الهندسي لإنبوبة Bourdon على انحراف رأس الأنبوبة

د. بدر الأعرج*

د. نيرودا بركات**

فراس صالح***

(تاريخ الإيداع 29 / 12 / 2019. قُبل للنشر في 24 / 2 / 2020)

□ ملخص □

تُستخدم أجهزة الضغط من نوع بوردون للكشف عن الضغوط في المنشآت الصناعية وفي أنظمة مراقبة الضغط ويتم تصنيع أنابيب بوردون بأشكال هندسية مختلفة، دائرية - C، حلزونية ولولبية ، بما يخدم استخدام هذه الأنبوبة من حيث التوضع والدقة. تصمم انبوبة C-Bourdon عن طريق لف عنصر أنبوبي دائرياً لتشكيل جزء من دائرة. وللحصول على جودة عالية للمنتج عند مردود أعظمي يلزمنا قياس دقيق لقيم الضغط في تجهيزات متعددة. وتمثل رأس أنبوبة بوردن عنصر حساس للضغط. يؤدي ضغط الدخل المطبق الى أراحة أو إنحراف رأس الأنبوبة عن الموضع الابتدائي. تم في هذه الدراسة محاكاة قياس الضغط في انبوبة بوردن عند مقاطع مختلفة وينسب محورية مختلفة لمعدن Ni-Span للحصول على افضل انحراف لرأس الانبوبة باستخدام برنامج solidworks. تم الحصول على النتائج الرقمية المعبرة عن انحراف رأس الأنبوبة لدى تطبيق الضغوط وقد تم ملاحظة أن المقاطع المنتظمة ذات فعالية واستجابة أفضل من المقاطع الغير منتظمة.

الكلمات المفتاحية: إنبوبة بوردن - مقياس ضغط - نسب محورية - انحراف رأس الأنبوبة.

*أستاذ - قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة تشرين - سورية

**دكتور - قسم التصميم والانتاج - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - سورية

***طالب دراسات عليا (دكتوراه) - قسم فيزياء الجسم الصلب - كلية العلوم - جامعة تشرين - سورية

Studying the effect of the geometric section shape of bourdon tube on the of tube tip

Dr. Badr Al-Aaraj*
Dr. Neruda Barakat**
Feras Saleh ***

(Received 29 / 12 / 2019. Accepted 24 / 2 /2020)

□ ABSTRACT □

Bourdon type pressure devices are used to detect pressure in industrial installations and pressure monitoring systems. Bourdon tubes are manufactured in various engineering shapes, circular-C, helical and spiral, to serve the use of this tube in terms of positioning and accuracy. C-Bourdon tube is designed by turning round tubular element to form part of circle. To obtain high product quality at maximum yield, we need an accurate measurement of pressure values in multiple installations. The end of the Borden tube is a pressure-sensitive element. The applied input pressure causes the tube end to be shifted or deviated from the initial position. In this study, the pressure measurement in Borden tube was simulated at different sections and with different axial ratios of Ni-Span metal to obtain the best tube end deviation using the solidworks program. Digital results expressing the deviation of the tube end were obtained when applying pressure and it was observed that the regular sections had better effectiveness and response than the irregular sections.

Keywords: Borden tube - pressure gauge - axial proportions - tube head deflection.

* Assistant professor – Department of Solid-state physics – Faculty of Sciences – Tishreen University

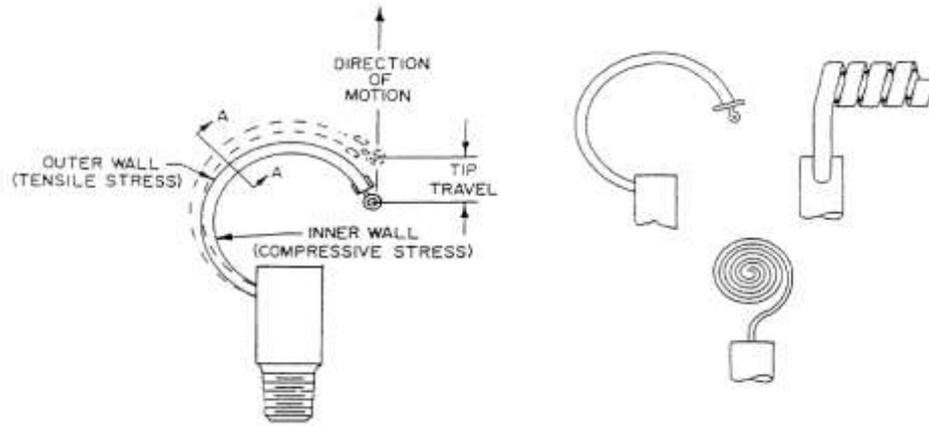
**Doctor - Department of Design and manufacturing – Faculty of Mechanical and electrical engineering – Tishreen University

***Ph.D. Student - Department of Solid-state physics – Faculty of Sciences – Tishreen University

مقدمة:

استخدام أنبوبة بوردين في التطبيقات الطبية والصناعية:

أصبحت اليوم أنبوبة بوردين (BT) Bourdon tube (الجزء المرن في مقاييس الضغط الميكانيكية) شائعة الاستخدام في العديد من التطبيقات الصناعية نظراً للسهولة الكبيرة في تصميمها ومبدأ عملها، يتناسب مقدار الانزياح في نهاية أنبوبة بوردين مع ضغط المائع المطبق، الأمر الذي يمكننا من استخدامها في صناعة مقاييس الضغط [1]، وإذا كانت مرونة المادة المصنوعة منها كبيرة، فإنه يمكن استخدامها في صناعة أصابع الروبوتات Robotic fingers والمشغلات الهيدروليكية والهوائية [3,2] Hydraulic and pneumatic actuators تستخدم المقاييس الكثرونية في قياس الضغوط ضمن التطبيقات الصناعية والطبية المعتمدة وهي تعتمد على الحساسات ومضخمات العمليات [4,5,6,7,8]، إلا أنها ذات مجال قياس محدود وخطأ يتجاوز 5% وهو ما يقلص من مجالات استخدامها. بالمقابل اثبتت أنبوبة بوردين جدارتها في قياس الضغوط ضمن مجالات مختلفة وذلك بتغيير معاملات الشكل وخصائص المواد لهذه الأنبوية [9] وخصوصاً أنها لا تحتاج إلى مصدر خارجي للطاقة. وبالرغم من أن أنبوبة بوردين نالت أول براءة اختراع منذ حوالي الـ 100 عام، إلا أن الأبحاث والدراسات، النظرية والتجريبية في تحسين دقة التوضع ونوع المواد المستخدمة، ما زالت مستمرة حتى هذا التاريخ [10,11,12]. ففي الوقت الحالي، تُنتج الصناعة سنوياً ملايين الأجهزة التي تعتمد على أنبوبة بوردين. وتزداد الحاجة يوماً بعد يوم إلى خصائص وميزات جديدة لهذه العناصر، نظراً لازدياد قسوة ظروف استثمار هذا النوع من الأجهزة (كازدياد شدة وتواتر الاهتزازات الميكانيكية)، هذا من جهة، ولتوسيع نطاق استثمار هذا النوع من العناصر المرنة من جهة أخرى. ضمن هذا السياق يتم تصميم أنبوبة بوردين بما يتلائم مع التطبيق الذي سيتم استخدامها فيها ويكون هذا الشكل عادة دائري أو حلزوني أو لولبي [11] لتأهيل الأنبوب لشروط قياس مختلفة.



الشكل (1): أنواع أنبوبة بوردين

استخدام برنامج Solidworks لمحاكاة أداء أنبوبة بوردين

يسمح برنامج التصميم والتحليل الرقمي بالقيام بدراسة ستاتيكية وديناميكية على سطوح الاجسام البسيطة (Part) والمركبة (Assembly) ويوفر مجال واسع من انواع القوى المراد تطبيقها (قوة، ضغط، اجهاد، حرارة) وبعد تنفيذ المحاكاة يوفر مخططات تبين الازاحة والاجهاد والشد بشكل يوضح توزيع القوى على الشكل بشكل رسومي عالي الدقة

وبالإضافة الى رسم منحنيات متغيرة مع الزمن (لنقطة محددة ضمن الجسم أو سطح أو مجموعة نقاط) لكل من البارامترات الميكانيكية السابقة [14,13].

الدراسات السابقة

درس العالم C. D. Conway عام 1995 معتمدا على معادلات الطاقة الكامنة المرنة إيجاد علاقة رياضية تربط انحراف الأنبوبة بالخصائص الهندسية والفيزيائية والضغط. وتبين نتائج مقارنة النتائج النظرية بالنتائج عن فشل هذه النماذج بالتنبؤ بالسلوك الدقيق لأنبوبة بوردون في بعض الحالات. قام العالمان K. Magnucki و W. Szyc عام 2000 بتحليل توزع الإجهادات واستقرار نهاية الأنبوبة كتابع لجميع وسطاء المسألة الهندسية والفيزيائية. درس العالمان S. P. Pirogov و N. N. Ustinov خلال الاعوام 2004 و 2010 و 2014 أثر عدم انتظام ثخانة جدار الأنبوبة على أداء الأنبوبة، ودور هذا العامل من الناحية التصميمية والوظيفية وتم إجراء نمذجة رياضية لتوزع الاجهادات ضمن الأنبوبة. قام العالم D. A. Cherenstov عام 2015 بدراسة نمذجة الاهتزازات الميكانيكية لأنبوبة بوردون في الأوساط عالية اللزوجة، وتحديد العوامل التي تؤدي إلى تخامد هذه الاهتزازات. وبناء على نتائج هذه الدراسة تم تصميم برنامج حاسوبي، لمساعدة الشركات الصناعية في تحديد المعايير التصميمية القادرة على الحد من أثر هذه الاهتزازات. قام العالم A.Y Chuba عام 2016 بدراسة الاهتزازات الخاصة لأنبوبة بوردون، وعلاقتها بمختلف الخصائص الهندسية والفيزيائية، بهدف تحديد الطرق الملائمة للحد من تأثيرها على سلوك الأنبوبة. درس العلماء -Y. FUJIWARA et al. و -Y. Saito & H. Niitsuma و -Y. TANAKA et al. خلال الأعوام 1996 و 1999 و 2005 إمكانية استخدام أنبوبة بوردون كمشغل هوائي: (BTA Bourdon Tubes Actuator) وهي من التطبيقات الهامة والطرق الجديدة في صناعة الروبوتات.

لم تغطِ الدراسات السابقة جميع الأشكال الهندسية الممكنة لأنبوبة بوردون (من حيث شكل المقطع العرضي، وطريقة تغير ثخانة جدار الأنبوبة على طولها)، وهذا من البارامترات التصميمية الهامة في تحسين الأداء الوظيفي لأنبوبة بوردون.

غياب نموذج نظري دقيق قادر على التنبؤ بسلوك أنبوبة بوردون عند قيم مختلفة لوسطاء المسألة الفيزيائية والهندسية، فافتقدت معظم الدراسات على الطرق التقريبية في تناول هذا الموضوع.

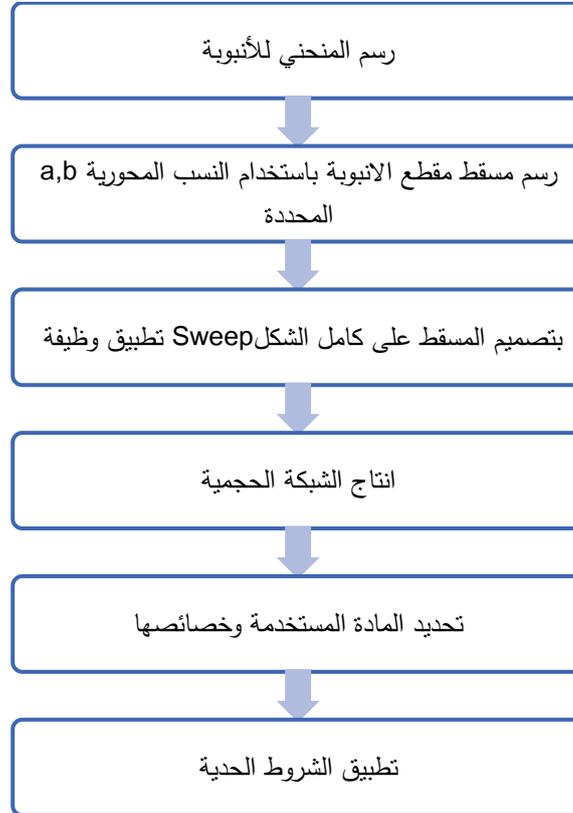
أهمية البحث وأهدافه

تهدف الدراسة الحالية إلى نمذجة أربع مقاطع لأنبوبة بوردون نوع-C حيث تم اقتراح مقطعين بسماكة جدران منتظمة، ومقطعين بسماكة جدران غير منتظمة لمعدن النيكل سبان للحصول على افضل انحراف لرأس الانبوبة عند نسب محورية، وضغوط مختلفة. وعلية يمكن صياغة أهداف البحث على الشكل التالي :

- دراسة اثر تغيير شكل المقطع الداخلي للأنبوب في مقدار الانزاحة.
- دراسة أثر تغيير النسب المحورية في استجابة المقاطع الاربعة المدروسة.

طرائق البحث ومواده :

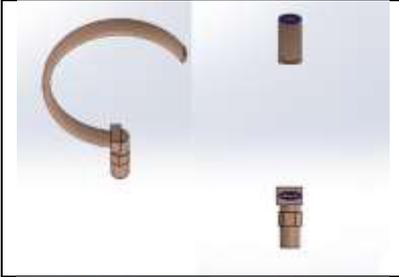
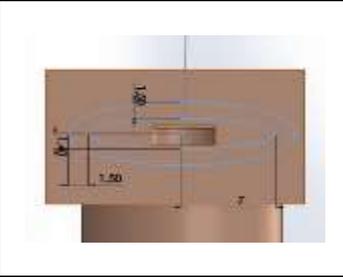
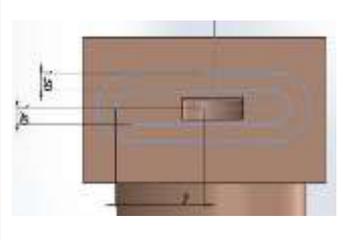
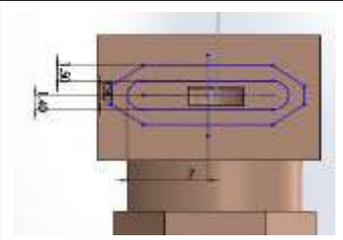
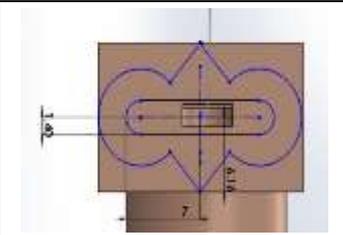
1-3- تم استخدام برنامج Solidwork لتحقيق النماذج الرقمية للمقاطع المقترحة حيث أخذت عملية التصميم المراحل التالية:



الشكل (2): المخطط المرحلي بتصميم ومحاكاة الإنبوية ضمن Solidworks

كل تصميم يشمل ثلاث نسخ ذات النسب المحورية التالية ($b/a = 0.2$, $b/a = 0.3$, $b/a = 0.4$) و يوضح المخطط الفرق بين عناصر بوردن المستخدمة

الجدول (1): أشكال وأبعاد المقاطع الأربعة المستخدمة

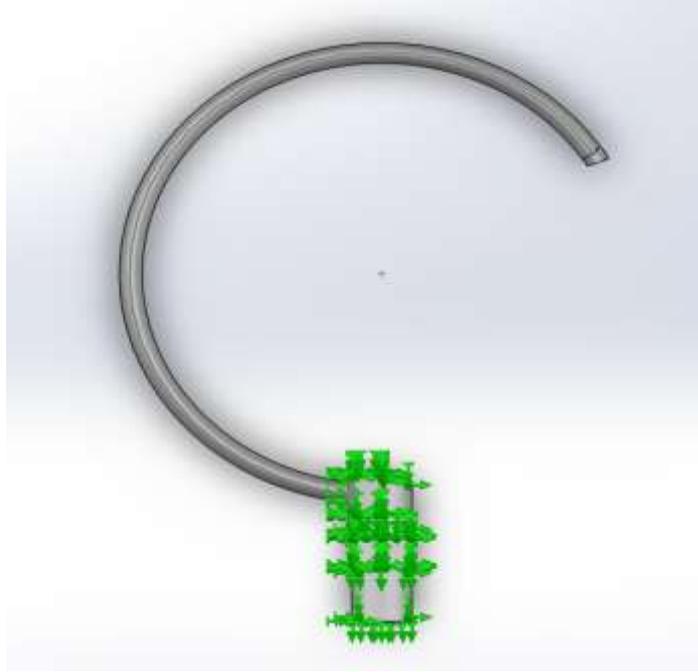
		عنصر بوردن ذات ثخانة جدار منتظمة دائرية	مقطع 1
		عنصر بوردن ذات ثخانة جدار منتظمة مستطيلة	مقطع 2
		عنصر بوردن ذات ثخانة جدار غير منتظمة	مقطع 3
		عنصر بوردن ذات ثخانة جدار غير منتظمة	مقطع 4

استخدمت مادة Ni-span في المحاكاة بحيث تشمل المحاكاة تطبيق ضغط خطي متغير (من 0 MPa إلى 1 MPa) على أسطح الجدران الداخلية للأنابيب السابقة و ليتم بعدها قياس قيمة الأراحة عند نهاية الأنبوب. يمكن صناعة أنابيب Bourdon من معادن حديدية أو لا حديدية حسب استخدام المقياس. يعتبر Ni-Span C شائع الاستخدام وذلك لسلوك حرارتها الاستثنائي.

جدول (2): يتضمن الخصائص الفيزيائية لمادة Ni-span:

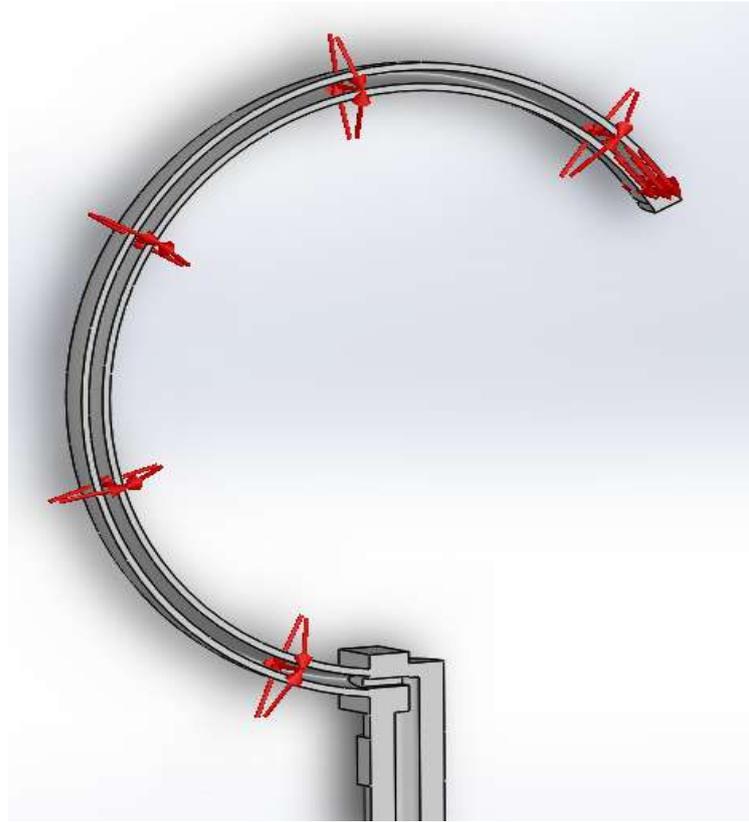
معامل المرونة	1.75E+11	N/m ²
نسبة بواسون	0.25	N/A
الكثافة الكتلية	8050	kg/m ³
شدة الشد	12 E+8	N/m ²
شدة الانضغاط	6118.26	N/m ²
معامل التمدد الحراري	2.74E-05	/°C
الناقلية الحرارية	0.260277	cal/(cm·sec·°C)
الحرارة النوعية	100.382	cal/(kg·°C)

تم تنفيذ المحاكاة باستخدام البرمترات التالية ضمن Solidworks:
 تم تثبيت كامل حركات ودورانات النموذج في القسم السفلي للأنبوبة وإتاحه الحركة للقسم العلوي بشكل يحاكي وضع النموذج في بيئة القياس كما هو موضح بالشكل(3).



الشكل (3): يوضح أنبوبة بوردن مع منطقة التثبيت أثناء المحاكاة

تم تطبيق ضغط خطي متغير ضمن المجال من 0-1 MPa بشكل منتظم على الجدران الداخلية لأنبوبة بوردون.



الشكل (4): يوضح مقطع لأنبوبة بوردين مع الضغط المطبق على الجدران الداخلية أثناء المحاكاة

تم تقطيع النموذج بالاعتماد على العناصر الحجمية ذات الشكل الهرمي وهي من أكثر العناصر استقراراً في تحليل النماذج الرقمية الرقيقة وقد احتوى نموذج الأنبوب على 5000 عنصر.

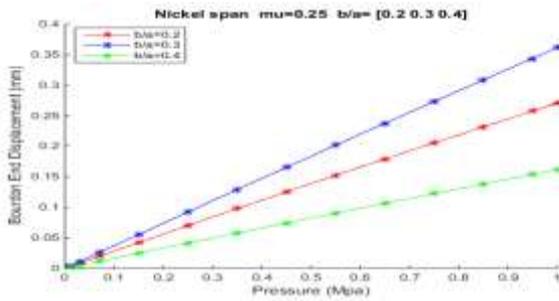
النتائج:

1-4-دراسة أثر تغير المقطع الداخلي في مقدار الأزاحة

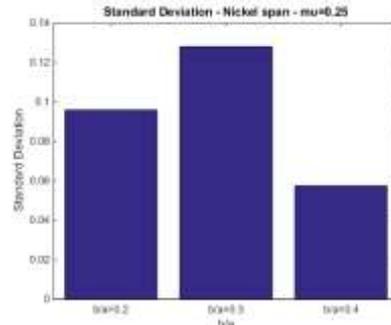
المقطع I ذي الجدران المنتظمة: عند تطبيق ضغط متغير على طول الجدران الداخلية لأنبوبة بوردين، نلاحظ ازدياد الأزاحة لنهاية الأنبوب بشكل واضح ويبين الجدول (3) قيم الأزاحة للثلاثين النسب المحورية المختلفة، وقد أبدت النسبة $b/a=0.3$ الانزياح الأعظمي والذي يعبر عن قراءة أكثر وضوحاً عند وصلها مع ميكانيزم المؤشر المرئي.

جدول (3): يحتوي على قيم انحراف رأس الأنبوية عند نسب محورية وضغوط مختلفة

P (Mpa)	Displacement (mm)		
	b/a = 0.2	b/a = 0.3	b/a = 0.4
0.01	0.002857	0.0037357	0.0016841
0.03	0.008561	0.0112000	0.0050484
0.07	0.019931	0.0260970	0.0117610
0.15	0.042517	0.0557700	0.0251220
0.25	0.070468	0.0926380	0.0417050
0.35	0.098109	0.1292600	0.0581580
0.45	0.125450	0.1656400	0.0744820
0.55	0.152490	0.2017800	0.0906790
0.65	0.179230	0.2376800	0.1067500
0.75	0.205690	0.2733500	0.1227000
0.85	0.231860	0.3087900	0.1385200
0.95	0.257760	0.3440000	0.1542300
1	0.270600	0.3615200	0.1620400
Deviation	0.09590	0.128100	0.057400



(a)



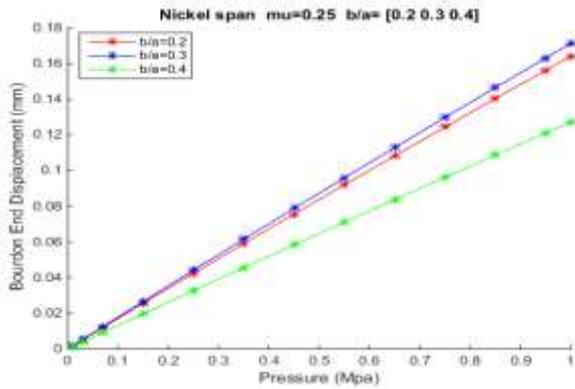
(b)

الشكل (5) (a) يوضح مقدار انتقال نهاية انبوية بودون بتابعية الضغط - (b) الإنحراف المعياري بتابعية النسبة المحورية لمادة Ni-Span ذات ثخانة منتظمة دائرية (مقطع 1)

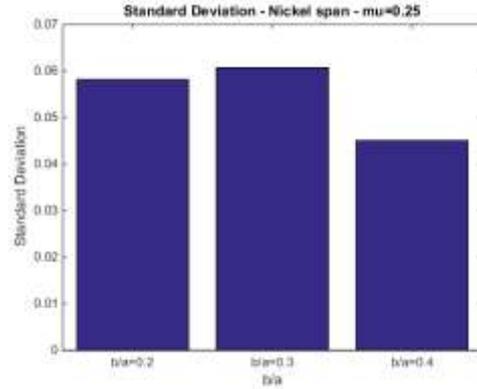
المقطع 2 ذي الجدران المنتظمة:

جدول (4): يحتوي على قيم انحراف رأس الأنبوية عند نسبة محورية وضغوط مختلفة

P (Mpa)	poison ratio = 0.25		
	Displacement (mm)		
	b/a = 0.2	b/a = 0.3	b/a = 0.4
0.01	0.0017107	0.0017809	0.0013154
0.03	0.0051277	0.0053384	0.0039434
0.07	0.0119440	0.0124360	0.0091886
0.15	0.0255080	0.0265650	0.0196360
0.25	0.0423340	0.0441000	0.0326150
0.35	0.0590190	0.0614980	0.0455060
0.45	0.0755640	0.0787590	0.0583090
0.55	0.0919720	0.0958860	0.0710260
0.65	0.1082400	0.1128800	0.0836570
0.75	0.1243800	0.1297400	0.0962040
0.85	0.1403900	0.1464800	0.1086700
0.95	0.1562600	0.1630800	0.1210500
1	0.1641500	0.1713400	0.1272100
Deviation	0.0582	0.0607	0.0451



(a)



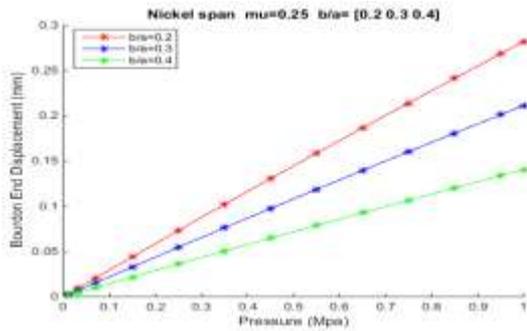
(b)

الشكل (6) (a) يوضح مقدار انتقال نهاية انبوية بودون بتابعة الضغط - (b) الإنحراف المعياري بتابعة النسبة المحورية لمادة Ni-Span ذات ثخانة منتظمة مستطيلة (مقطع 2)

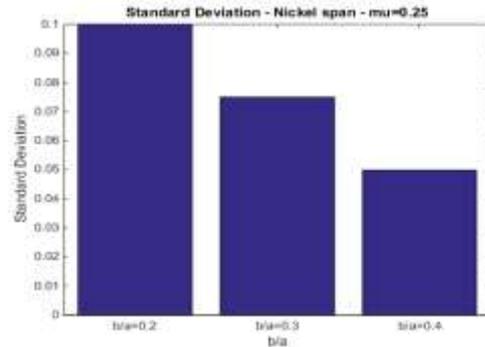
المقطع 3 ذي الجدران غير المنتظمة:

جدول (5): يحتوي على قيم انحراف رأس الأنبوية عند نسبة محورية وضغوط مختلفة

P (Mpa)	Displacement (mm)		
	b/a = 0.2	b/a = 0.3	b/a = 0.4
0.01	0.002968	0.0022140	0.0014656
0.03	0.0088945	0.0066357	0.0043931
0.07	0.0207100	0.0154540	0.0102340
0.15	0.0441940	0.0329900	0.0218570
0.25	0.0732750	0.0547240	0.0362790
0.35	0.1020600	0.0762550	0.0505830
0.45	0.1305400	0.0975840	0.0647720
0.55	0.1587400	0.1187200	0.0788450
0.65	0.1866500	0.1396500	0.0928060
0.75	0.2142800	0.1604000	0.1066500
0.85	0.2416300	0.1809500	0.1203900
0.95	0.2687100	0.2013200	0.1340200
1	0.2821500	0.2114400	0.140800
Deviation	0.1	0.0749	0.0499



(a)



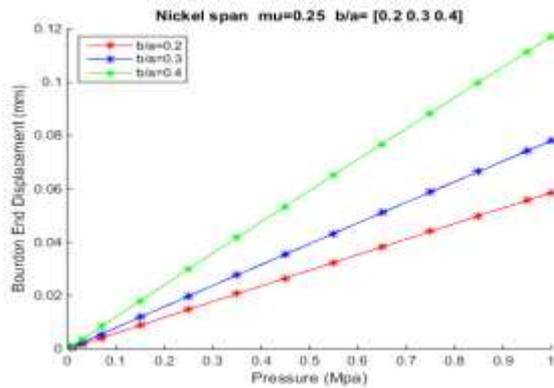
(b)

الشكل (7) (a) يوضح مقدار انتقال نهاية أنبوبة بودون بتابعية الضغط - (b) الانحراف المعياري بتابعية النسبة المحورية لمادة Ni-Span ذات ثخانة غير منتظمة (مقطع 3)

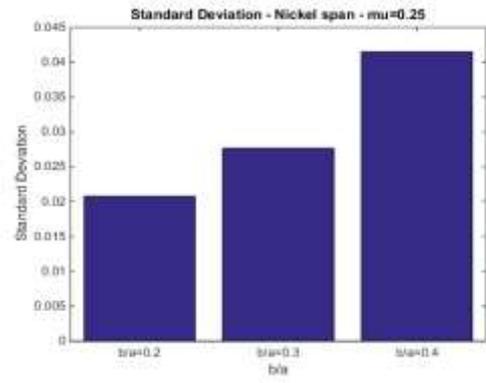
المقطع 4 ذي الجدران غير المنتظمة:

جدول (6): يحتوي على قيم انحراف رأس الأنبوية عند نسبة محورية وضغوط مختلفة

P (Mpa)	Displacement (mm)		
	b/a = 0.2	b/a = 0.3	b/a = 0.4
0.01	0.00059341	0.00079589	0.00120390
0.03	0.00177980	0.00238670	0.00360970
0.07	0.00415080	0.00556460	0.00841330
0.15	0.00888550	0.01190500	0.01798800
0.25	0.01479100	0.01980300	0.02989800
0.35	0.02068100	0.02767000	0.04174100
0.45	0.02655600	0.03550600	0.05352000
0.55	0.03241700	0.04331100	0.06523300
0.65	0.03826300	0.05108600	0.07688300
0.75	0.04409400	0.05883000	0.08846900
0.85	0.04991100	0.06654500	0.09999300
0.95	0.05571400	0.07422900	0.11145000
1	0.05860900	0.0780600	0.11716000
Deviation	0.0208	0.0276	0.0415



(a)



(b)

الشكل (8) (a) يوضح مقدار انتقال نهاية أنبوية بودون بتابعة الضغط - (b) الإنحراف المعياري بتابعة النسبة المحورية لمادة Ni- Span ذات ثخانة غير منتظمة (مقطع 4)

الاستنتاجات والتوصيات

في هذا البحث ناقشنا أهمية أنبوية بودون وتطبيقاتها الصناعية، وقد بيّنا أهمية العمل على دراسة تأثير شكل المقاطع لانبوية بودون على انزياح نهايتها. حيث تمت محاكاة أربعة أشكال مقاطع لأنابيب بودون (منتظمة - وغير منتظمة) بنسب محورية مختلفة (0.2, 0.3, 0.4)، بينت نتائج المحاكاة أنه في حالة المقاطع ذات الثخانة المنتظمة فإن نسبة (b/a=0.3) تحقق أعلى درجة ازاحة وضمن هذه الفئة من المقاطع كانت المقاطع الدائرية المنتظمة ذات ازاحة

وتتميزية أعلى من باقي المقاطع المنتظمة، بينما في حالة المقاطع الغير منتظمة هناك اختلافات في الازاحات الاعظمية لنفس النسب المحورية ولكن باختلاف شكل المقطع الغير منتظم، فالمقطع 3 الذي يشابه المقطع المستطيل ولكن بتوزع ثخانة غير منتظم قد أبدى ازاحة عالية عند النسبة المحورية (b/a=0.2)، بالمقابل أبدى المقطع 4 الذي يعبر عن توزع أكثر عشوائية ازاحة أقل بكثير. من خلال ما سبق يتبين لدينا أن المقاطع المنتظمة ذات فعالية واستجابة أفضل من المقاطع الغير منتظمة. وفي المراحل القادمة سيتم العمل على تصميم أنابيب بنفس الخصائص وتجربتها على نفس البرمترات ومقارنة النتائج التجريبية الواقعية مع النتائج التحليلية وأيضاً دراسة تغير الاستجابة بتغير المواد المستخدمة.

Reference

- [1] Morris, A. S., & Langari, R. "Measurement and instrumentation: theory and application". Academic Press (2012).
- [2].Y. Saito and H. Niitsuma "A Study of the Pneumatic Bourdon Tubes Actuator (BTA) for a Precise Positioning Robotics" Proceedings of the JFPS International Symposium on Fluid Power, Vol.1999, No.4, P 661-666(1999).
- [3].Y. FUJIWARA et al. "Study of a Pneumatic Robot Utilizing a BTA (Bourdon Tube Actuator)" Proceedings of the JFPS International Symposium on Fluid Power (1996).
- [4].Bera. S.C., Mandal. N., Sarkar. R., "Study of a Pressure Transmitter Using an Improved Inductance Bridge Network and Bourdon Tube as Transducer", IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 60, Issue. 4, pp. 1453 - 1460, 2011.
- [5].S.Maitra, "Two Wire Pressure Transmitter using Bourdon Tube Pressure Sensor and LVDT – An Advance Pressure Transmitter", CAE, vol. 3- No. 6, Nov, 2015.
- [6]. Marick.S., Bera.S.K., Bera.S.C., "A Modified Technique of Flow Transducer Using Bourdon Tube as Primary Sensing Element", IEEE Sensors Journal, Vol. 14 , pp. 3033 - 3039, 2014.
- [7].K. V. L. Narayana and Bhujangarao. A, "Design and development of a pressure transmitter using modified inductance measuring network and bellow sensor," Sensors & Transducers Journal, vol. 150, no.3, pp. 32– 39, March 2013.
- [8]. S. Chattopadhyay, J. Sarkar, and S. C. Bera, "A low cost design and development of a reluctance type pressure transducer," Measurement, vol. 46, no. 1, pp. 491–496, Jan. 2013.
- [9]. A.Y Chuba "Wall thickness influence on the manometric tubular spring vibrations", International scientific journal "innovative science", №6, ISSN 2410-6070 (2016).
- [10]. D. A. Cherenstov "Mathematical simulation of manometric tubular spring vibrations in viscous media" PhD thesis, University of Tyumen, Russia (2015).
- [11].C. D. Conway "Analytical analysis of tip travel in a Bourdon tube" MSc thesis, Naval Postgraduate School Monterey, California, USA (1995).
- [12].Marick.S., Bera.S.K., Bera.S.C., "A Modified Technique of Flow Transducer Using Bourdon Tube as Primary Sensing Element", IEEE Sensors Journal, Vol. 14, Issue- 9, pp. 3033 -3039, 2014.
- [13] Ferroudji, F. Static Strength Analysis of a Full-scale 850 kW wind Turbine Steel Tower, International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT), Vol 8, Issue-3S. (2019).
- [14] Alla, M. R. S., & Sagar, M. V Static and Dynamic Analysis of a Two Wheeler Shock Absorber Using Different Materials for Helical Coil Spring. shock, 6(03),(2019).