

دراسة عددية لعملية تشكيل الانابيب بضغط السائل باستخدام قوالب مخروطية

تحسين طه عثمان القهوجي / قسم الميكانيك/ كلية الهندسة/ جامعة تكريت، العراق
احمد امين حسين / قسم الميكانيك/ كلية الهندسة/ جامعة تكريت، العراق
الخلاصة

تم دراسة عملية تشكيل الانابيب بضغط السائل من ناحية تأثير زاوية القالب و ضغط السائل والقوة المحورية على مسارات الحمل بواسطة تطبيق برنامج (ANSYS14) في تنفيذ طريقة العناصر المحددة (Finite Element Method), والحصول على مسارات الحمل المثلى لتشكيل الانبوب في قالب على شكل ثنائي المخروط وثلثا زوايا للقالب بلغت ($116^\circ, 126^\circ, 136^\circ$) و ثلاثة أقطار خارجية للأنبوب بلغت $(50,45,40)$ mm و تثبيت طول تجويف القالب عند قيمة (50) mm وطول العينة $L_0 = 80$ mm وسمك $t_0 = 2$ mm). اهم النتائج والاستنتاجات التي تم التوصل اليها كانت اعلى نسبة مئوية في تنحيف جدار الانبوب %26.8 مع اقل ملئ للزاوية هو عند قطر $(40$ mm) وزاوية القالب (116°) بضغط تشكيل (43 MPa) وتغذية محورية عند كل طرف $(10$ mm) واقل نسبة مئوية في تنحيف جدار الانبوب (6.9%) مع افضل ملئ للزاوية عند قطر $(50$ mm) وزاوية القالب (136°) بضغط تشكيل $(30$ MPa) وتغذية محورية عند كل طرف $(4.5$ mm). كما لوحظ تشكل تجعديتين خلال المراحل الابتدائية عند تشكيل الانبوب بقطر ابتدائي $(40$ mm) اذ ان نسبة $(d/t = 20)$ لذلك تعدّ انابيب سميكة الجدران وهذا بالنسبة لكل الزوايا للقالب في حين تشكلت تجعديّة واحدة فقط في مركز الانبوب عند قطر $(50,45)$ mm و باتجاه الانابيب الرقيقة اي ان نسبة $(d/t > 20)$. ان الاختلاف في موقع وعدد التجعديّة المشكلة في المرحلة الاولى من التشكيل يعود الى مسار الحمل الذي تم اختياره لكل عملية والذي بدوره يحدد نمط التشكيل فعند القطر $(40$ mm) كان نمط التشكيل القص الصرف أما عند القطر $(50,45$ mm) اي باتجاه الانابيب رقيقة الجدران فكان نمط التشكيل احادي الشد. أما اعلى نسبة للتنحيف فوجد في قمة الانتفاخ عندما يكون قطر الانبوب $(40$ mm) وتكون اعلى نسبة للتنحيف على جانبي قمة الانتفاخ عندما يكون قطر الانبوب $(50,45)$ mm).

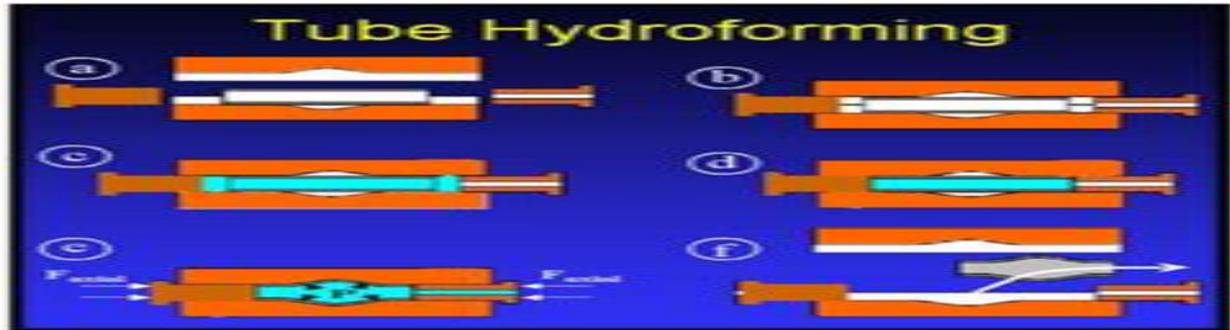
الكلمات الدالة : الدونة، تشكيل الانابيب بضغط السائل ، مسارات الحمل ، الانحناء ، التجعد .

المصطلحات والرموز:		
L_0 الطول الابتدائي	mm	P ضغط السائل الداخلي
l_f طول تجويف القالب	mm	t_0 - سمك جدار الانبوب
FEM: طريقة العناصر المحددة		θ - الزاوية القالب
THF: تشكيل الانبوب بضغط السائل		d القطر الخارجي للأنبوب
loading paths - مسارات الحمل		μ : معامل الاحتكاك
deformation mode: نمط التشكيل		σ_1 : الاجهاد المماسي
pure shear: القص الصرف		σ_2 : الاجهاد الطولي
uniaxial tension: الشد الاحادي		ϵ_1 : الانفعال المماسي
		ϵ_2 : الانفعال الطولي

1-المقدمة :

أصبحت عملية (THF) تطبيق بشكل واسع ومتزايد في صناعة السيارات والصناعات الفضائية وكثير من المنتجات ذات الجدران الرقيقة اي النسبة بين قطر الانبوب (d) وسمك الجدار (t) هي $d/t > 20$ [1]. إذ تمتاز هذه الطريقة بجودة عالية للمنتجات في الخواص الميكانيكية والشكل النهائي والكلفة القليلة وتقليل وقت التصنيع. و تعدّ كل من الشكل الهندسي للقالب والانبوب والابعاد الابتدائية ومادة الانبوب والضغط الداخلي والقوى المحورية من المتغيرات المهمة في هذه العملية [2,3]. باستخدام عملية (THF) يمكن ان يتشكل الانتفاخ (bulge) في عدد من الخطوات بموجب مسارات الحمل للضغط الداخلي والتغذية المحورية لمعدن الانبوب [4,5] او كلا النهايتين واللتان يمكن ان تكونا مقيدتين.

تشكيل الانابيب بضغط السائل (THF) Tube Hydroforming هي عملية تشكيل الانابيب بمقاطع عرضية مختلفة بواسطة تسليط ضغط سائل (زيت او ماء) داخل انبوب مغلق من الجهتين وموضوع داخل قالب معدني ذو تجويف داخلي معين ويتم رفع قيمة ضغط السائل الداخلي حتى يجبر الانبوب الداخلي المجوف ان يتوافق مع شكل ومنحنيات الجدار الداخلي للقالب ويمكن اضافة متغير آخر لهذه العملية وهي القوى المحورية على نهايتي الانبوب وقيمة هذه القوى المحورية يجب ان لا تقل عن مستوى منع تسرب السائل من نهايتي الانبوب كما موضح في الشكل (1) وتزداد مع زيادة الضغط داخل الانبوب ولها دور كبير في زيادة القطر.



شكل (1) يبين خطوات عملية التشكيل بضغط السائل [15]

أما **Xiao-Lei Cui** و **أخرون [20]** درسوا سلوك التشكيل بتسليط ضغط خارجي و داخلي على جدار الأنبوب باستخدام قوالب مربعة نظريا وعمليا. وتوصل الى ان الصلادة HV تزداد في المنطقة الانتقالية عند تسليط ضغط خارجي على جدار الأنبوب. وتم اشتقاق معادلات بسيطة لتخمين الضغط اللازم لتشكيل انابيب مصنوعة من طبقتين وتم التحقق من دقة النتائج النظرية تجريبيا [21] **S. M. Hossen**.

وتم استخدام توزيع السمك للمنتوج الفعلي في التحقق من نتائج المستحصلة عن طريق العناصر المحددة FEM لدراسة تأثير عوامل الشكل والتصلب الانفعالي على التمدد الموضعي في عملية THF من قبل **S. L. Lin [22]** و **أخرون**.

ولبيان تأثير كل من الشكل الهندسي والتزليج على قابلية تشكيل الانابيب في العملية فقد قدم **P. V. Reddy [23]** و **أخرون** دراسة نظرية و عددية لهذا الشأن وتوصلوا الى ان القيم الكبيرة لمعامل الاحتكاك تؤدي الى توزيع منتظم لسمك جدار الأنبوب في المنطقة المنتخفة وان الضغط الداخلي المطلوب لملى فراغات القالب يتناسب طرديا مع معامل الاحتكاك.

وأثبتت الدراسة المقدمة من قبل **Y. M. Hwang [24]** بانه بالإمكان انتاج اشكال معقدة وذلك عن طريق استخدام قوالب متحركة بدلا من قوالب ثابتة كالمعتاد. ولقلة المعلومات المتوفرة حول دور المعالجات الحرارية في عملية THF توصل كل من **P. V. Reedy [25]** و **أخرون** على ان الضغط المطلوب للتشكيل في العملية يقل مع زيادة درجة حرارة المعالجة ما بين 150°C الى 200°C ويعاود الصعود عند 250°C وذلك باستخدام SS304 كمادة للعينات المشكلة.

ولمعرفة تأثير النسبة L/D حيث ان L يمثل طول الأنبوب و D يمثل قطر الأنبوب على توزيع النفعالات ولنعين من حالات الحدود (ثبوت النهائيين و بوجود التغذية المحورية) فلو حظ بان توزيع يكون احادي الاتجاه (unidirectional) في حالة $L/D = 1$ بينما يكون ثنائي الاتجاه (bidirectional) في حالتي $L/D = 2,3$ **B. G. L/D [26]**.

Marlapalle, R. S.

في هذا البحث تم دراسة تأثير زاوية القالب المخروطي على توزيع النسبة المئوية لتتحيف جدار العينات الاسطوانية ودراسة تأثير ضغط السائل على ملئ زاوية القالب المخروطي باستخدام برنامج ANSYS.

2- النموذج المقترح

يعتبر ملئ الاركان من قبل جدار الأنبوب في عملية THF مقياس لمدى نجاح العملية. وقد درست هذه الظاهرة من قبل العديد من الباحثين [7] [19] لحالة توازي خط رأس الزاوية مع محور الأنبوب وهناك شحة في الدراسات لحالة تعامد خط رأس الزاوية مع محور القالب. في هذه الدراسة تم اقتراح نموذج ثنائي المخروط للقالب كما مبين في الشكل (2).

وتم اختيار ثلاثة قوالب وبثلاث قيم للزاوية (θ) $(136, 126, 116)^{\circ}$ لتشكيل انابيب مصنوعة من سبيكة الألمنيوم AL6061 وبأقطار خارجية $mm (40, 45, 50)$ وطول $L_o = 80 mm$ وبسمك ابتدائي $t_o = 2 mm$ وكما مبين في جدول رقم (1).

تم افتراض القالب على انه تام الجساء (perfect rigid body) ومعادن الأنبوب يتبع اللاقعة الاسية $\sigma = k\epsilon^n$ والمعدن تم افتراضه على انه مشكل على البارد ومتمائل الخواص إتجاهيا (isotropic) ومتجانس (homogenous) ومعيار الفشل يحسب عن طريق اجهاد فون مايسز وسمك جدار الأنبوب النهائي، واكبر نسبة لتحيف في جدار الأنبوب هي 28% اعتبرت كمعيار للفشل في محاكاة العناصر المحددة [11]، وبفرض التزييت التام في تحليل العناصر المحددة وبمعامل احتكاك $(\mu = 0.05)$.

اثناء عملية THF تحدث الاجهادات الانضغاطية في المناطق التي يكون فيها معدن الأنبوب معرضا الى قوى محورية وتحدث اجهادات الشد في مناطق التوسع واهم العيوب الرئيسية لهذه العملية المتمثلة ب الانبعاج (buckling) والتجعد (wrinkling) وسببها الاجهاد الضغطي العالي المفرط اما التشقق (bursting) فيعود الى اجهاد الشد العالي المفرط. من الواضح ان هناك علاقة ملائمة بين مخطط الضغط الداخلي ومخطط التغذية المحورية مقابل الزمن والتي تدعى بمسارات الحمل (loading paths) والتي تضمن عملية تشكيل (THF) ناجحة بدون حدوث أي فشل [6].

قيمة ضغط السائل الداخلي المطلوب في عملية التشكيل (THF) تعتمد على اقل زاوية في شكل الجزء المنتج والذي يحدد دقة ابعاد الاجزاء المشكلة بضغط السائل [7] لذلك فان دراسة قابلية التشكيل

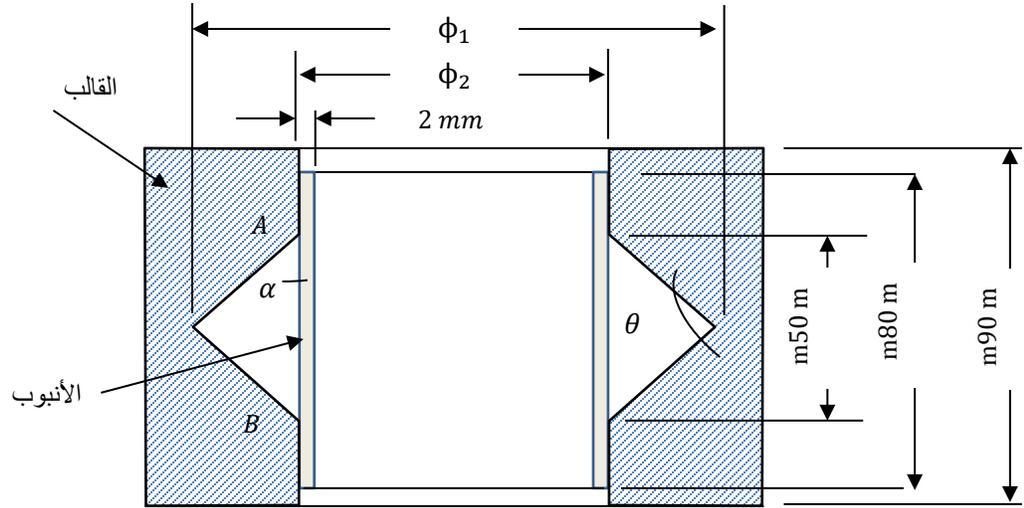
لمادة الأنبوب ضروري في تصميم THF عملية تشكيل الانابيب بضغط السائل هي عملية انتاج معقدة نسبياً واداء هذه العملية يعتمد على عدة عوامل ويتطلب الدقة العالية لتصميم الاجزاء واختيار المعدن والشروط الحديدية لذلك فان افضل طريقة لدراسة المسار العملي هو بواسطة استخدام التقنيات العددية وخاصة طريقة العناصر المحددة , ويمكن محاكاة هذه العمليات باستخدام برنامج [8,9,10] ANSYS.

قام العديد من الباحثين بدراسة موضوع تشكيل الانابيب بضغط السائل اذ قام **Hatem Orban, S. Jack Hu [12]** و **أخرون** بدراسة تأثير الاحتكاك في منطقة التلامس بين سطح القالب الداخلي و سطح الأنبوب الخارجي ووجدوا ان للاحتكاك له دورا مهما في توزيع سمك للجدار خلال عملية التشكيل وتم تطوير نموذج تحليلي لحساب التغير في الاجهادات على طول جدار الأنبوب اثناء زيادة الضغط الداخلي لتوسيع الأنبوب الدائري الى المقطع المربع واستنادا الى النموذج التحليلي تم اجراء دراسة على تأثير معامل الاحتكاك وخواص المعدن على توزيع سمك المقطع العرضي للأنابيب المشكلة.

درس **Shijian Yuan [13]** و **أخرون** , تأثير سلوك التجاعيد على قابلية التشكيل وتوزيع السمك في تشكيل الانابيب بضغط السائل وتم تصنيف التجاعيد الى ثلاثة اصناف تجاعيد مفيدة وتجاعيد خاملة وتجاعيد متمزقة، التجاعيد الخاملة وتجاعيد المتمزقة هي عيوب في تشكيل الانابيب بضغط السائل، يمكن ان نحصل على تحسين قابلية التشكيل والحصول على اكبر نسبة توسيع للجزء المشكل بواسطة التجاعيد المفيدة ، ويكون سمك الجزء المشكل في هذه التجاعيد غير منتظم على طول اتجاه المحور وذلك بسبب ان الجزء انتج عن طريق تسطيح التجاعيد.

قدم كل من **Deepak Kuma و Rajeev Kant [14]** تحليلاً لتخمين نصف القطر المثالي لمدخل القالب والضغط الهيدروستاتيكي المثالي للتشكيل المتمائل لنتوء الأنبوب بضغط السائل داخل انبوب مقيد في قالب مغلق بحيث ان الأنبوب يظهر اعظم تشكّل دون وصول مرحلة الفشل، ان الشكل الهندسي للانبوب الفارغ وخواص معدن الأنبوب وقطر الانتفاخ معلومات ضرورية في التحليل باستخدام طريقة العناصر المحددة (FEM) وتنفيذ هذه الطريقة بواسطة تطبيق برنامج ANSYS.

درس **S.M.H.Seyedkashi [15]** و **أخرون** تأثير ابعاد الأنبوب على مسارات الحمل المثالية لكل من الضغط الداخلي والقوى المحورية حيث ان السيطرة الدقيقة لكل من الضغط والقوى في مسارات الحمل يؤثر كثيرا على نوعية المنتج النهائي لعملية THF, باستعمال طريقة التحليل العددي تم الحصول على مسارات الحمل المثالية لأشكال هندسية مختلفة للأنبوب مع نسبة توسيع ثابتة للمقارنة بينها، كذلك تم دراسة تأثير كل من القطر الابتدائي للأنبوب وسمك الجدار للأنبوب على مدى توافق جدار الأنبوب مع شكل القالب.



شكل (2) يبين شكل وأبعاد القالب المستخدم

جدول (1)

قيم ϕ_1 (mm) لكل قطر خارجي للأنبوب ولكل زاوية

	$\phi_2 = d = 40$ mm	$\phi_2 = d = 45$ mm	$\phi_2 = d = 50$ mm
$\theta = 116^\circ$	72	77	82
$\theta = 120^\circ$	66	71	76
$\theta = 136^\circ$	60	65	70

ويبين الجدول (2) يبين الخواص الميكانيكية لسبيكة الالمنيوم AL-6061.

جدول (2)

الخواص الميكانيكية لسبيكة الالمنيوم AL-6061

young modulus , E	70 GPa
Poisson ratio , ν	0.3
Yield stress , σ_y	70 MPa
Tangent modulus , ET	0.1 GPa
Density , ρ	2720 Kg/m ³
Coefficient of friction , μ	0.05

3- الاجهادات والانفعالات في عملية THF .

$$\bar{\epsilon} = \sqrt{4/3 (1 + \beta + \beta^2)} \epsilon_1$$

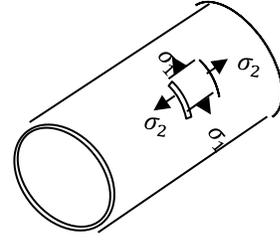
حيث ان:-

$$\alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \dots \dots \dots (1)$$

$$\beta = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \dots \dots \dots (2)$$

يتعرض جدار الانابيب الرقيقة في عملية THF الى نوعين من الاجهادات شكل (3) وهما الاجهاد الطولي σ_2 و الاجهاد المماسي σ_1 ويرافقهما الانفعالات الطولي ϵ_2 و المماسي ϵ_1 وحسب مفهوم ليفي ميسز فان الاجهاد المكافئ والانفعال المكافئ

$$\bar{\sigma} = \sqrt{1 - \alpha + \alpha^2} \sigma_1$$



والطريقة الثانية من خلال أوامر ANSYS والتي طبقت في هذا البحث لإدخال البيانات المستخدمة في التحليل.

5-الخطوات الأساسية لبناء وتحليل اي نموذج باستخدام برنامج ANSYS.14

5-1 إنشاء النموذج الهندسي

بعد ادخال الخواص الميكانيكية لمادة الانبوب ومبينة في جدول رقم (2) تم تمثيل العينة بالقياسات المشار اليها في الجدول رقم (1) داخل قالب على شكل ثنائي المخروط. طول تجويف القالب هو (50 mm) ولتقليل تأثير الحافة الحادة لمدخل القالب (نقطتي A و B شكل (2)) تم رسم قوس بنصف قطر مقداره (2 mm) وطول منطقة التلامس بين الانبوب والقالب في كل نهاية من نهايتي الانبوب هو (15 mm) ولتجنب تأثير تغير هذه الابعاد تم اعتبارها ثابتة والمتغير هو فقط الزاوية (θ).

5-2 العناصر المستخدمة في الدراسة

استخدم العنصر PLANE183 في لتمثيل مادة العينة (الجزء المشكل) وله سلوك ازاحة من الدرجة الثانية ومعرف بثماني عقد او ست عقد ويمكن ان يستخدم كعنصر مستوي في حالة الاجهاد المستوي (plane stress) والانفعال المستوي (plane strain) او متناظر axisymmetric element وله قابلية في تحليل مسائل اللدونة والمرونة العالية hyperelasticity والزحف والميلان الكبير والشكل (4) يوضح مواقع العقد ونظام المحاور للعنصر.

شكل (3) يبين الاجهادات التي يتعرض عليها جدار الانبوب في عملية THF. وتطبيق معادلة لفي ميسر فتكون العلاقة بين الاجهادات والانفعالات لللدنة بالشكل التالي

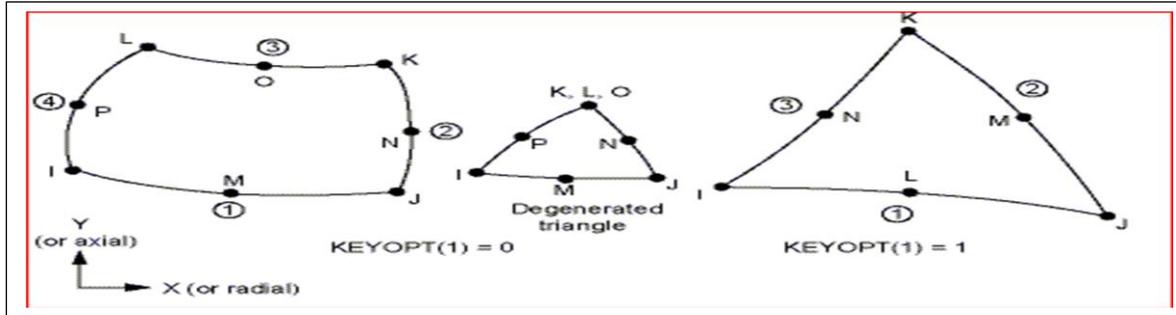
$$\alpha = (2\beta + 1)/(2 + \beta) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\beta = (2\alpha - 1)/(2 - \alpha) \quad \dots\dots\dots (4)$$

في حالة القص الصرف (pure shear) فإن $\alpha = \beta = -1$, اما في حالة الشد الأحادي (uniaxial tension) فإن $\alpha = 0$ و $\beta = -0.5$.

4-برنامج ANSYS 14

ان برنامج ANSYS يعد الحزمة البرمجية المستخدمة في تنفيذ طريقة العناصر المحددة حيث تشير طريقة العناصر المحددة الى الاسلوب المستخدم للحصول على الحل العددي للتطبيق المطلوب وكما هو معروف فإن هذه الطريقة تستخدم العديد من المعادلات الجبرية الأنية، يعد برنامج ANSYS من البرامج المستخدمة عالميا واكثرها شهرة في مجال الدراسات المتقدمة والابحاث، وقد وجد ان معظم الابحاث في الجامعات العالمية تستخدم هذا البرنامج وخاصة في حل المسائل اللاخطية المعقدة , وهناك طريقتان لتنفيذ البرنامج. الطريقة الاولى تكون بشكل تفاعلي من خلال واجهة المستخدم الرسومية (GUI)

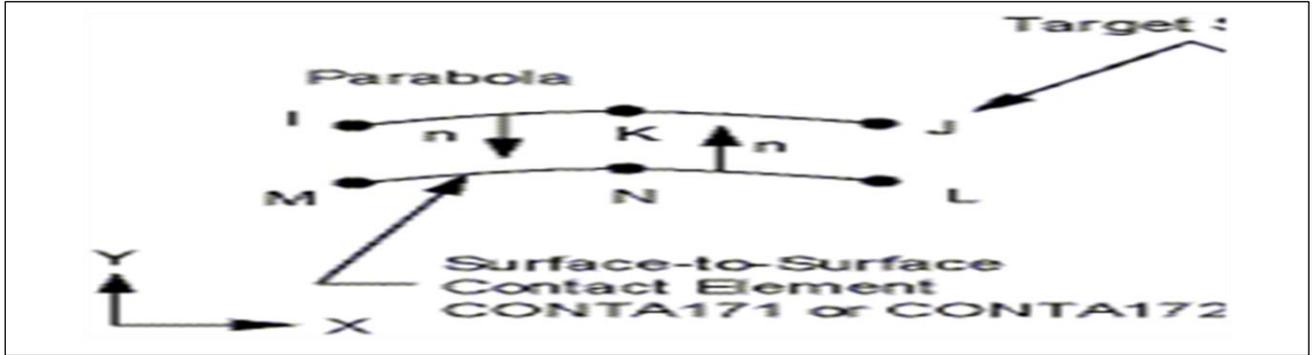


شكل (4) العنصر plane183

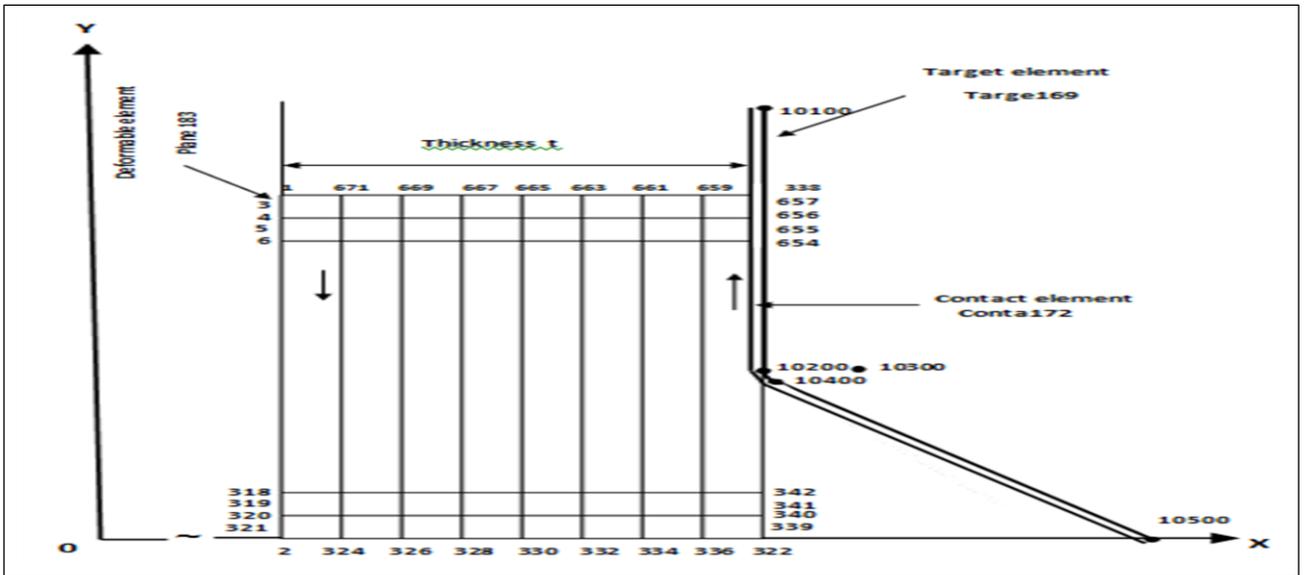
5-3 رسم الشبكة على النموذج mesh of model

في هذه الدراسة تم فرض حجم العنصر (0.25 mm) ونسبة الطول الى العرض تساوي (aspect ratio=1) وبالإستفادة من حالة التناظر في الشكل من الممكن اجراء نموذج ثنائي البعد 2D لربع المجموعة (القالب مع الانبوب) كما موضح في الشكل (6).

اما القالب فتم تمثيله باستخدام عنصر (TARGET169) والذي يستخدم لتمثيل الأجسام الجاسنة لحالة ثنائية الابعاد ويرافق هذا العنصر عنصر CONTA172 لتمثيل منطقة التماس بين القالب والعينة ويمكن تعريفه بأنه كيان هندسي وهمي يتحسس ويستجيب عند حركة عنصر المادة المشكلة على عنصر القالب. ومن خلال هذا العنصر يتم التحكم بقيمة معامل الاحتكاك بين الاسطح المتلامسة. وكما مبين في الشكل (5) [17,16].



شكل (5) العنصر TARGE169 مع عنصر التماس CONTA172



شكل (6) ربع المجموعة (القالب والانبوب) وتوزيع العناصر والعقد واتجاه ترقيم العقد للمجموعة

5-5 تطبيق الشروط الحدية

لتقييد الازاحة على بعض العقد nodes تطبيق الشروط الحدية من خلال اختيار الاحداثي الذي تقع عليه هذه العقد، في هذه الدراسة تم اختيار العقد التي تقع في الموقع $y=0$ وتقييد ازاحتها باتجاه المحور y اي الازاحة $Uy=0$ لكون النموذج المرسوم يمثل ربع الواقع.

6- النتائج والمناقشة

بعد التحقق من النتائج المستحصلة من نمذجة المسألة ومقارنة نتائجها مع تلك المستحصلة من مصدر [11] تم مناقشة نتائج عملية تشكيل الانابيب بضغط السائل من ناحية تأثير زاوية القالب و ضغط السائل والقوة المحورية على مسارات الحمل بواسطة تطبيق برنامج ANSYS لغرض اجراء المحاكاة. قدمت المحاكاة نتائج التشكيل للانابيب بأقطار خارجية ابتدائية وزوايا للقالب والموضحة في الجدول (3). وعُدَّ كلُّ من الطول والسمك للانبوب ثابتين وبمقدار 80 mm و 2 mm على التوالي، وكذلك تم تثبيت طول تجويف القالب عند 50 mm وهذا بالنسبة لكل حالات التشكيل

4-5 الاسطح المتلامسة contact surface

مسائل التماس تكون لا خطية ويحتاج حلها الى برامج حاسوبية، ومن الضروري فهم الحالة الفيزيائية للمسألة واخذ الوقت الكافي لتحضير النموذج ليعمل بكفاءة عالية. توجد صعوبتان في مسائل التماس الاولى- عدم معرفة مناطق التماس ما لم يتم اجراء المحاكاة و اعتماداً على الاحمال والمادة والشروط الحدية وعوامل اخرى فالأسطح يمكن ان تقترب او تبعد عن بعضها في اسلوب غير متوقع. والثانية- اغلب مسائل التماس تحتاج الى تفسير للاحتكاك . هنالك العديد من القوانين للاحتكاك وجميعها لا خطية. الاستجابة للاحتكاك يمكن ان تكون غير دقيقة مما يؤدي الى صعوبة تقارب الحل (solution convergence). هناك ثلاثة نماذج للتماس في برنامج ANSYS وهي:

(surface-to-surface, node-to-surface, node-to-node) وكل نموذج يستخدم مجموعة مختلفة من عناصر التماس. في هذه الدراسة استخدم نموذج التماس surface-to-surface

الجدول (3)

اقطار الانابيب وزوايا القالب

Tube diameter mm	die corner angle θ		
40	116°	126°	136°
45			
50			

1-6 مسارات الحمل (loading paths)

نتج عنها افضل تشكيل مع اقل تنحيف في جدار الانبوب وكما موضح في الجدول (4).

تم اعتماد مسارات حمل لتشكيل الانابيب باستخدام المحاكات ولتسع حالات بحيث تم اختيار قيم الضغط الداخلي والتغذية المحورية التي

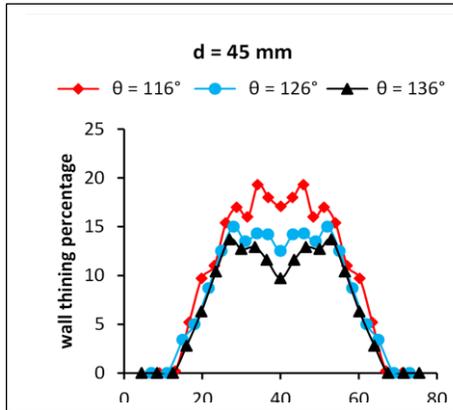
الجدول (4)

يبين الضغط الداخلي النهائي والتغذية المحورية النهائية لمسارات الحمل للحالات التسعة

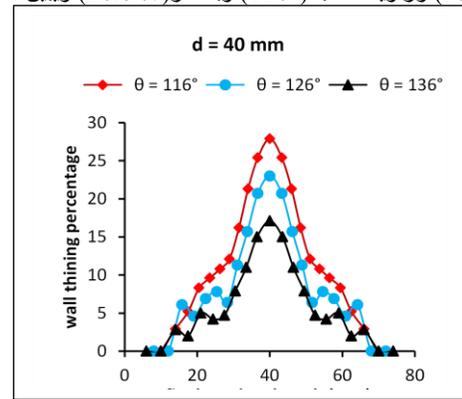
No. of path	Tube diameter (mm)	Die corner angle	Final axial feed (mm)	Final Internal pressure (MPa)
1	40	116°	10	43
2	45		8.5	40
3	50		7.5	40
4	40	126°	8	39
5	45		7	36
6	50		6.5	35
7	40	136°	6	35
8	45		4.5	32
9	50		4.5	30

النسبة المئوية للتخفيف في الجدار على طول الانبوب المشكل بقطر ابتدائي (40 mm) وثلاثة زوايا للقالب (136,126,116)° ويلاحظ ان اعلى مقدار لنسبة التخفيف المئوية تكون في قمة الانتفاخ bulge apex وللزوايا الثلاث للقالب ولكن تقل هذه النسبة مع

تم اعتبار عدم تجاوز النسبة المئوية للتخفيف في جدار الانبوب المشكل 28 % كمعيار للفشل في محاكاة العناصر المحددة [19,11], لذلك تم اختيار مسارات الحمل لكل حالات التشكيل بحيث لم يتجاوز التخفيف هذه النسبة , كانت اعلى نسبة مئوية للتخفيف عند قطر الانبوب 40 (mm) وزاوية القالب (116°) وبمقدار (26.8 %) ويبين الشكل (7)



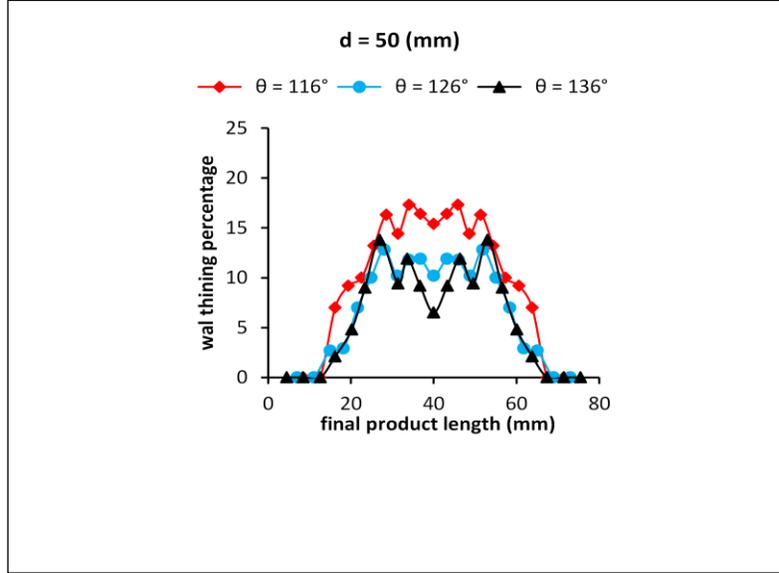
شكل (8) النسبة المئوية للتخفيف في سمك الجدار لأنبوب بقطر 45 mm



شكل (7) النسبة المئوية للتخفيف في سمك الجدار لأنبوب بقطر 40 mm

الجدران اي نسبة $d/t \leq 20$ اما الانابيب رقيقة الجدران نسبة $d/t > 20$ فان اعلى مقدار للتخفيف لا يحصل في قمة الانتفاخ بل على جانبي مركز الانبوب

زيادة زاوية القالب، اما عندما يكون القطر الابتدائي للأنبوب (45 mm) وللزاوية الثلاث للقالب $(136, 126, 116)^\circ$ فان اعلى نسبة مئوية للتخفيف لا تحصل في قمة الانتفاخ كما موضح في الشكلين (8) و(9). ويستنتج من هذا ان اعلى مقدار للتخفيف في جدار الانبوب المشكل يحصل في قمة الانتفاخ بالنسبة للأنابيب سميكة



شكل (9) النسبة المئوية للتخفيف في سمك الجدار لأنبوب بقطر 50 mm

الداخلي للقالب وبحسب مبدأ ثبوت الحجم فان جدار الانبوب يتعرض الى التخفيف ومن خلال التغذية المحورية يتم تعويض كمية من المادة وبالتالي تقليل من عملية تخفيف الحاصل في الجدار. ان وجود تناغم (synchronization) بين الضغط السائل والتغذية المحورية يسبب انتظام في السمك، اما اذا كانت التغذية المحورية اكبر من المطلوب (كما هي في الدراسة الحالية) فان جدار الانبوب يتعرض الى حالة من الانبعاج وشكل الانبعاج (تجيده او تجعيدتان) يعتمد على كل من d/t و p/p_0 [27] حيث ان p يمثل الضغط المسلط و p_0 يمثل الضغط المسبب لخضوع مادة الانبوب، ان نشوء تجعيدتان على طرفي مركز الانبوب يؤدي الى تماس جدار الانبوب مع سطح الداخلي للقالب كما مبين في الشكل (10) حيث تتولد قوة احتكاك تعيق التغذية الجانبية لمركز الانبوب وبالتالي فان اكبر تخفيف يحدث عند مركز الانبوب.

7- الاستنتاجات Conclusions

- 1- يزداد مقدار التغذية المحورية كلما كانت زاوية القالب die (corner angle) والنسبة (d/t) اصغر.
- 2- تتشكل تجعيدتان (two wrinkles) على طرفي مركز الانبوب في بداية مراحل التشكيل عندما يكون نمط التشكيل (pure shear). في حين تتشكل تجعيده واحدة في مركز الانبوب عندما يكون نمط التشكيل uniaxial tension.
- 3- افضل مسار حمل (loading path) لتشكيل الانابيب سميكة الجدران هو الذي يكون فيه نمط التشكيل (pure shear) , في حين يكون نمط التشكيل (uniaxial tension) هو الافضل لتشكيل الانابيب رقيقة الجدران.
- 4- اعلى نسبة تخفيف في جدار الانبوب تكون في قمة الانتفاخ بالنسبة للأنابيب سميكة الجدران. في حين تكون على جانبي قمة الانتفاخ بالنسبة للأنابيب رقيقة الجدران.

ولتفسير الاختلاف في نسبة التخفيف وموقع التخفيف على الجدار , يلاحظ نشوء تجعيدتين على طرفي مركز الانبوب في بداية التشكيل لأنبوب بقطر (40 mm) ولمختلف الزوايا للقالب في حين تنشأ تجعيدة واحدة فقط في مركز الانبوب عندما يكون قطر الانبوب (45 mm) و (50 mm)، وبعد اجراء مقارنة المحاكاة (simulation) لأنبوب بقطر (40 mm) مع قطر (45 mm) وبزاوية للقالب (126°) يلاحظ في الخطوة الاولى من التشكيل نشوء تجعيدتين على طرفي مركز الانبوب عندما يكون قطر الانبوب (40 mm) بينما تنشأ تجعيدة واحدة في مركز الانبوب عند القطر (45 mm) والسبب في اختلاف موقع نشوء التجاعيد وعدد هذه التجاعيد ما بين القطر (45 mm) و (40 mm) يعود الى مسار الحمل الذي بدوره يحدد نمط التشكيل فعندما يكون قطر الانبوب (40 mm) تزداد نسبة التوسيع المطلوبة للتشكيل النهائي وهذا يتطلب زيادة في التغذية المحورية مما يجعل نمط التشكيل (pure shear) لتفادي التخفيف المفرط في جدار الانبوب المشكل. وعندما يكون قطر الانبوب (45 mm) فان نسبة التوسيع تكون اقل والتشكيل النهائي يتطلب تغذية محورية اقل نسبياً لذلك نمط التشكيل يكون (uniaxial tension). ويستنتج انه عند تشكيل الانابيب سميكة الجدران وينسب توسيع عالية فان افضل نمط للتشكيل هو (pure shear) وذلك للحصول على اقل نسبة تخفيف في جدار الانبوب , وعندما تكون الانابيب رقيقة الجدران فان نمط التشكيل الافضل هو (uniaxial tension) والشكل (10) يبين خطوات التشكيل بنمط (pure shear) للأنبوب بقطر 40 mm وزاوية للقالب (116°) ، والشكل (11) يبين خطوات التشكيل بنمط (uniaxial tension) لأنبوب بقطر (45 mm) وزاوية للقالب (116°) ويستنتج من ذلك ان النسبة (d/t) هي التي تحدد نمط التشكيل وليس زاوية القالب θ .

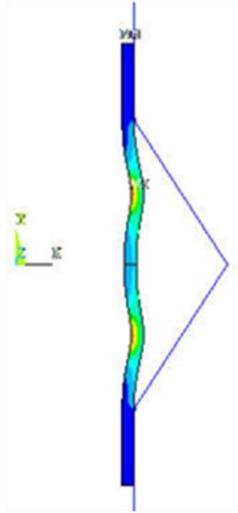
ان مسار الحمل في عملية THF يتكون من الضغط الداخلي والتغذية المحورية. الضغط الداخلي يسبب انتفاخ الانبوب ليأخذ الشكل

- 3- دراسة تأثير الاحتكاك بين جدار الأنبوب المشكل والتجويف الداخلي للقالب وتأثير نوع المعدن القالب وخشونة سطحه
- 4- ايجاد علاقة عامة يمكن من خلالها تحديد مناطق التشكيل والفسل ونسبة التوسيع من خلال معرفة متغيرات المعدن وأبعاد وشكل التجويف الداخلي للقالب .
- 5- إجراء دراسة عملية لتشكيل الانابيب بضغط السائل في قالب ثنائي المخروط ومقارنتها بنتائج برنامج Ansys

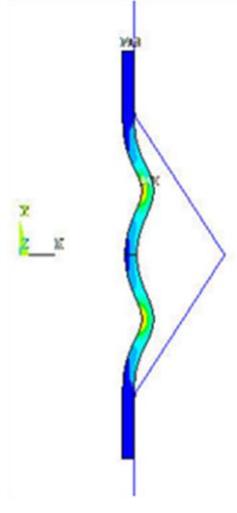
5- نقل النسبة المثوية للتخفيف في الجدار مع زيادة النسبة (d/t) اي باتجاه الانابيب رقيقة الجدران

8- التوصيات Recommendations

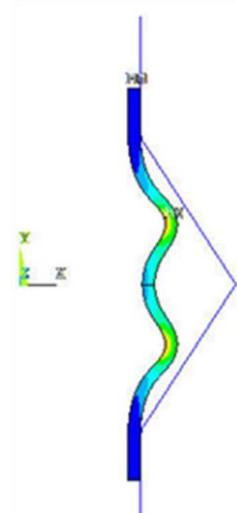
- 1- دراسة تأثير سمك جدار الأنبوب على مسارات الحمل ونسبة التوسيع .
- 2- دراسة نسبة طول التجويف للقالب الى القطر الخارجي للأنبوب (l_f/d) .



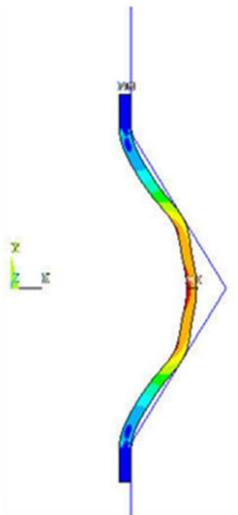
pressure = 2 Mpa
axial feeding = 4 mm



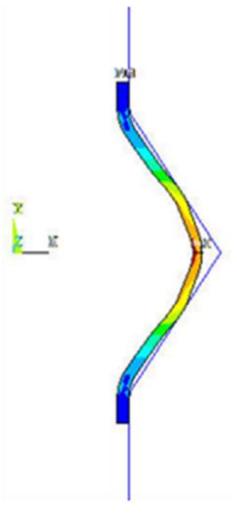
pressure = 5 Mpa
axial feeding = 8 mm



pressure = 9 Mpa
axial feeding = 14 mm



pressure = 10 Mpa
axial feeding = 18 mm

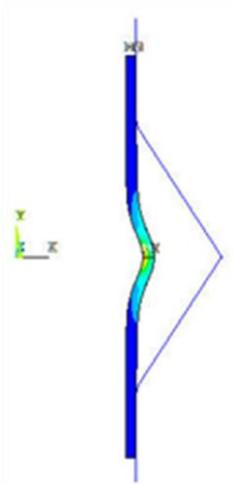


pressure = 11 Mpa
axial feeding = 20 mm

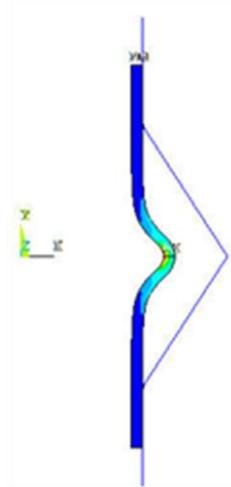


pressure = 43 Mpa
axial feeding = 20 mm

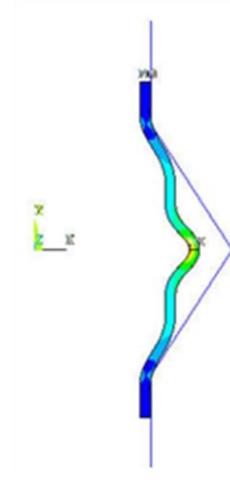
شكل (10) يبين خطوات تشكيل الأنبوب بقطر 40 mm وزاوية القالب 116° بنمط التشكيل pure shear



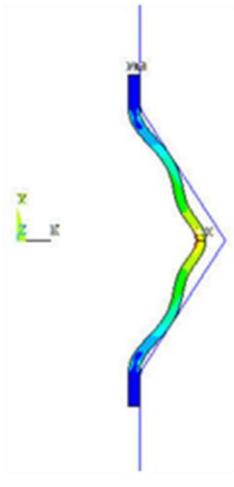
**pressure = 2 Mpa
axial feeding = 4 mm**



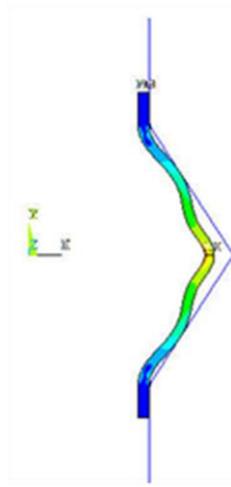
**pressure = 5 Mpa
axial feeding = 8 mm**



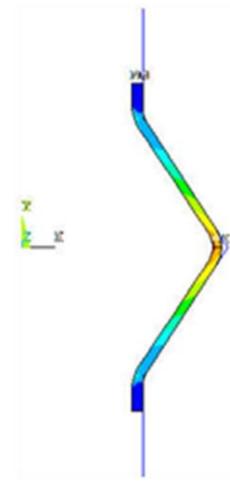
**pressure = 8 Mpa
axial feeding = 14 mm**



**pressure = 8 Mpa
axial feeding = 17 mm**



**pressure = 9 Mpa
axial feeding = 17 mm**



**pressure = 40 Mpa
axial feeding = 17 mm**

شكل (11) خطوات تشكيل الأنبوب بقطر 45mm وزاوية القالب 116° بنمط التشكيل uniaxial tension

References

المصادر

- [1]. Hearn EJ. Mechanics of materials 2. 3 rd ed., 1997 Elsevier Ltd.
- [2]. Elyasi M, Bakhshi-Jooyari M, Gorji A. Mechanism of improvement of die corner filling in a new hydroforming for stepped tubes. *Materials and Design* 2009; (30):3824-3830.
- [3]. Poudeau N, Lejeune A, Gelin JC Influence of material and process parameters on the development of necking and bursting in flange and tube hydroforming. *Materials .Processing Technology 2002*. (125-126) 849 – 855.
- [4]. Zhang SH. Development in hydroforming. *Materials .Processing Technology* 1999. 91(1-3) 236 – 244.
- [5]. Woo DM. Tube-bulging under internal pressure and axial force. *Journal of Engineering Materials and Technology* 1973; 95(4): 219-223.
- [6]. Bakhshi-Jooyari M, Elyasi M, Gorji A. Numerical and experimental investigation of the effect of the pressure path on forming metallic bellows. *J.Engineering Manufacture*. 2009; (224): 95-101
- [7]. Fuh-kuo Chen, Shao-Jun Wang, Ray-Hau Lin. A study of forming pressure in the tube hydroforming process. *Journal of Materials Processing Technology* 2007; (192-193): 404-409 .
- [8]. Din Islam Md.. Experimental and finite Element study of the hydroforming Bi-layered tubular component. *M.Sc. Thesis. Dublin City University*; (2005)
- [9]. Mac Donald BJ, Hashmi MSJ. Three dimensional finite element simulation of bulge forming using a solid bulging medium. *Finite Elements in Analysis and Design* 2001; 37 (2): 107-116
- [10]. Hwang YM, Altan T. Finite element analysis of tube hydroforming processes in a rectangular die. *Finite Element in Analysis and Design* 2003; 39 (11): 1071-1082
- [11]. Seyedkashi SMH, Naeini HM, Liaghat GH., Mashadi MM, Mirzaali M, Shojaee K, Moon YH. The effect of tube dimensions on optimized pressure and force loading paths in tube hydroforming process. *Journal of Mechanical Science and Technology* 2012; 26 (6):1817-1822.
- [12]. Hatem O, Jack HS. Analytical modeling of wall thinning during corner filling in structural tube hydroforming. *Journal of Materials processing Technology* 2007;194 (1): 7-14 .
- [13]. Shijian Y, Wenjian Y, Xiaosong W, Effect of wrinkling behavior on formability and thickness distribution in tube hydroforming. *Journal Of Materials Processing Technology* 2006; 177(1-3): 668-671.
- [14]. Rajeev K, Deepak K, Effect of Die Entrance Radius on Tube Formability In closed-Die Tube Hydroforming. *International Journal of Applied science and Technology Research* 2011; 1 (1).1: 1-6
- [15]. Nishtant J. Modeling and analysis of dual hydroforming process. Mechanical Engineering. M.Sc. Thesis. Texas A&M University; (2003)
- [16]. Mirzaali M, Seyedkashi SMH, Liaghat GH, Moslemi N, shojaee K, Moon YH. Application of simulated annealing method to pressure and force loading optimization in tube hydroforming process. *International Journal of Mechanical Sciences* , 2012; 55(1):78-84

- [17]. Yang C, Ngaile G, Analytical model for planar tube hydroforming: Prediction of formed shape, corner fill, wall thinning, and forming pressure. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2008;50 (1):1263-1297
- [18]. Cui XL, Wang XS, Yuan SJ, Deformation analysis of double-sided tube hydroforming in square-section die. *Journal of Material Processing Technology*, 2014; 214 (7): 1341-1351
- [19]. Hossen SM, Valiollah PR, Haibin Xu, Sang YK, Young HM, Process analysis of two-layered tube hydroforming with analytical and experimental verification. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2013; 27 (1): 169-175.
- [20]. Lin SL, Chen ZW, F. Chen K , A study on localized expansion defects in tube hydroforming. *Journal of Chinese Institute of Engineers*, 2018; 41 (2): 149-159.
- [21]. Reddy PV, Reddy BV, Ramulu PJ, An investigation on tube hydroforming process considering the effect of frictional coefficient and corner radius. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 2020; 6 (1): 84-103.
- [22]. Hwang YM, Tsai YJ, Movable die and loading path design in tube hydroforming of Irregular bellows. *Journal of Metals*, 2020; 10 (1): 2-13.
- [23]. Reedy PV, Reddy BV, Ramulu PJ, Effect of heat treatment temperatures on formability of SS304 during tube hydroforming process. *SN Applied Sciences*, 2020; 2 (205)
- [24]. Bapurao GM,. Rahul Kumar SH Predictions of formability parameters in tube hydroforming process. *SN Applied Sciences*, 2021; 3(606)
- [25]. Paquette JA, Kyriakides S. Plastic buckling of tubes under axial compression and internal pressure. *International Journal of Mechanical Sciences* 2006; 48 (1): 855–867