

تعديل معادلة وورد (Ward) لحساب ضغط البثق للطور الصلب للبوليمرات باستخدام نظرية الحد الأدنى⁺

A MODIFICATION OF THE WARD EQUATION FOR COMPUTING THE PRESSURE EXTRUSION FOR SOLID PHASE POLYMERS BY USING LOWER BOUND THEORY

موجد هادي عناد**

محمد حميد جعفر*

المستخلص:

تم في هذا البحث استنتاج معادله لحساب ضغط البثق (P) للطور الصلب للبوليمر نظرياً وذلك بإدخال تأثير الشغل الفائض (WR) (Redundant Work) وتأثير معدل الارتفاع في أجهاد الانسياب (σ_f) على معادلة الباحث (Ward) لحساب ضغط البثق النظري باستخدام نظرية الحد الأدنى (Lower bound theory). وتم مقارنة النتائج النظرية للمعادلة المعدلة (الجديدة) لحساب الضغط (P) مع نتائج الباحث (Ward) والنتائج العملية للبحث من خلال دراسة تأثير كل من نسب التخصر (R%) (7.01, 21.55, 43.7, 58.7, 71.3) وقيم زاوية نصف القالب (α°) (7.5, 15, 20, 25, 30) عند معدل انفعال مقداره 33×10^{-4} / ثا. حيث اجريت التجارب العمليه على نوعين من البوليمرات هما البولي اثلين عالي الكثافه والبولي اثلين واطى الكثافه خلال تسعة قوالب مخروطيه على جهاز الضغط وباستخدام زيت التشحيم. أظهرت النتائج أن المعادلة المعدلة أعطت نسبة اقتراب مقداره (96, 92.9) % من النتائج العملية على التوالي لنسبة التخصر وزاوية نصف القالب وهي أفضل من النتائج التي وجدها (Ward) والتي كانت نسبة اقترابها (92, 84.4) % على التوالي من القيم العملية.

Abstract:

In this research a formula for computing the theoretical extrusion for solid phase of polymers has been concluded. The Formula was adapted from the Ward equation (by the use of lower bound theory) by adding the redundant Work effects (W_R) and strain rate in the flow stress effects (σ_f) to the formula.

The theoretical results of the pressure (p) for the new formula was testing and compared with the theoretical results of the Ward equation and with the practical experimental results. The comparison parameters were the effect of reduction ratios (R%) (7.01, 21.55, 43.7, 58.7, 71.3) % and semi - die angle (α°) (7.5, 15, 20, 25, 30) on the extrusion pressure at the strain rate equal to (33×10^{-4} /sec). Practical Experiments have been done in two kinds the high density polyethelene and low density polyethelene through nine cone dies on pressure instrument by use Grease oil

The results of the modified formula showed that the results in the reduction ratios and the semi - die angle gave an approaching (96, 92.9) % compared with the practical experimental results respectively.

⁺ تاريخ استلام البحث ٢٠٠٨/١١/١٠ ، تاريخ قبول النشر ٢٠٠٩/١٢/٢٩ .

* مدرس/ المعهد التقني / كوفه

** مدرس/ الكلية التقنية / النجف

The new formula gave a better agreement Compared Ward equation which gave approaching (92 , 84.4) % respectively from practical experimental Results .

قائمة بالرموز المستخدمة في البحث

الوحدات	الوصف	الرمز
N/mm^2	أجهاد الأنسياب عند انفعال مقداره ع ومعدل انفعال غ	σ_f
N/mm^2	الإجهاد العمودي المؤثر في مستوى القص	σ_n
N/mm^2	ضغط القالب	σ_r
N/mm^2	الإجهاد المسلط باتجاه البثق	σ_x
N/mm^2	أجهاد الخضوع	σ_y
	النسبة الثابتة	π
	معامل الاحتكاك	μ
degree	زاوية نصف القالب	α
mm	نصف قطر القالب في بداية التشكيل	r_0
mm	نصف قطر القالب في نهاية التشكيل	r
N/mm^2	أجهاد القص الحرج	τ
	معامل الاحتكاك الداخلي بين حبيبات المادة	μ_i
N/mm^2	ضغط البثق	p
	معامل الاحتكاك العمودي	m_0
	الانفعال الحقيقي	ϵ
	معدل الانفعال النهائي	ϵ_f
Sec^{-1}	معدل الانفعال	$\dot{\epsilon}$
N/mm^2	أجهاد الخضوع القصي	K
$N.m$	الشغل الفائض في بداية القالب ونهاية القالب	W_R

المقدمة :

أن تقدم الصناعة في السنوات الأخيرة وتعدد استخدامات البوليمرات بشكل واسع لخواصها الجيدة وسهولة تداولها ورخص ثمنها جعلها تستخدم في كثير من التطبيقات الهندسية منها ((صناعة السيارات ، أواني الطعام في المطابخ ، الانابيب بأقطارها المختلفة، الخ...)) [1].

وأن من أهم طرق تصنيع البوليمرات هي عملية بثق البوليمرات والتي من خلالها يتم تحسين الخواص الميكانيكية و الفيزيائية للمبثوقات وذلك باستخدام لولب البثق المزدوج (Twin screw Extrusion TSE) والذي يزيد من توجه سلاسل البوليمرات باتجاه تسليط الضغط والذي يؤدي إلى زيادة أجهاد الخضوع ومعامل المرونة ونقطة الانصهار [2] .

درس الباحثان (Mudalamane and Bigio) [3] إمكانية السيطرة على سرعة حركة كتلة البوليمر المبتوق باستخدام تقنية لولب البثق المزدوج (TSE) للتخلص من ظاهرة التمدد في المنتج وتقويم سطحه للحصول على مواصفات إنهاء سطحي عالية الجودة .

أما الباحث (Rodrigue وآخرون) [4] درسوا إمكانية الحصول على أفضل شكل هندسي للقالب (زاوية قالب ونسبة تخرص) في عملية بثق الطور الصلب للبوليمر باستخدام طريقة تقسيم البوليمر في منطقة البثق (التشكيل) إلى شبكة للوصول إلى أفضل شكل هندسي للقالب .

الباحث (Patrick وآخرون) [5] أعطوا خرائط واضحة لتوزيع معدلات الانفعال ومسارات أجهاد الأنسياب للبثق المزدوج للبوليمر متعدد الطبقات خلال قنوات مربعة ومستطيلة وهذه النتائج تم التوصل لها باستخدام أسلوب (Viscoelastie) للحصول على أفضل اقتراب مع النتائج النظرية.

الجزء النظري :

تعتبر طريقة الباحث (Sach) أكثر الطرق استخداماً مع نظرية الحد الأدنى ، حيث يفترض في معادلته حالة توازن القوى المؤثرة على شريحة من المادة خلال الجزء المخروط من القالب (وكما يظهر الشكل في الملحق للبحث) والتي تعرف بمنطقة التشكيل (Deformation Zone) وتكتب هذه المعادلة بالشكل التالي [6].

$$(\sigma_x - d\sigma_x)(r+dr)^2 \cdot \pi = \sigma_x \cdot r^2 \cdot \pi + \sigma_r (2\pi \cdot r \cdot dr / \sin \alpha) [\sin \alpha + \mu \cos \alpha] \dots \dots \dots 1$$

وبما أن :

$$\epsilon = \ln (r_o / r)^2 \rightarrow d\epsilon = -2 \cdot dr / r \dots \dots \dots 2$$

وبالتبسيط وتعويض معادله (2) في معادله (1) نحصل على :

$$\frac{d\sigma_x}{d\epsilon} = \sigma_x - \sigma_r (1 + \mu \cot \alpha) \dots \dots \dots 3$$

المعادلة أعلاه هي معادلة الباحث (Sach) التي تحسب الضغط اللازم للبثق باستخدام نظرية الحد الأدنى .
أما الباحث Ward فقد استفاد من تطبيق معادلة Coulomb للخضوع [6] وهي :

$$\tau_c = \tau + \mu_i \cdot \sigma_n \text{ (Coulomb eq.)} \dots \dots \dots 4$$

حيث أفترض الباحث (Ward) [7] أن محور سلسلة البوليمرات تتجه باتجاه عملية البثق ، وبالتالي فإن سلوك الخضوع لمواد البوليمرات يتأثر بالأجهاد العمودي (σ_r) على اتجاه البثق وكذلك يتأثر بمركبة القص ($\sigma_x - \sigma_r$) . وأفترض أيضاً أن تأثير الأجهاد العمودي سوف يزيد أجهاد الأنسياب بالعامل ($1 + m_o \cdot \sigma_r$) ، هذه الافتراضات تقود إلى استنتاج المعادلة التالية التي تصف سلوك الخضوع للبوليمرات بالاعتماد على نظرية Coulomb للخضوع .

$$(\sigma_x - \sigma_r) = \sigma_y (\epsilon_f \cdot \epsilon) \cdot (1 + m_o \cdot \sigma_r) \dots \dots \dots 5$$

وبتعويض معادله (٥) في معادله (٣) نحصل على

$$\frac{d\sigma_x}{d\varepsilon} = \sigma_x - \left[\frac{\sigma_x - \sigma_f(\varepsilon_f \cdot \varepsilon \cdot)}{1 + m_o \cdot \sigma_f(\varepsilon_f \cdot \varepsilon \cdot)} \right] (1 + \mu \cot \alpha) \dots \dots \dots 6$$

وهذه المعادلة تأخذ بنظر الاعتبار تأثير الإجهاد العمودي ومعدل الانفعال على سلوك الخضوع للبوليمرات ،
وبتكامل المعادلة أعلاه وتبسيطها نحصل على:

$$\sigma_x = - \frac{\sigma_f(\varepsilon_f \cdot \varepsilon \cdot) * \varepsilon_f (1 + \mu \cot \alpha)}{\left[1 + m_o * \sigma_f(\varepsilon_f \cdot \varepsilon \cdot) * (1 - \varepsilon_f) * (1 + \varepsilon_f) * (1 + \mu \cot \alpha) \right]} \dots \dots \dots 7$$

∴ P = -σ_x

أذن معادلة حساب الضغط عند بثق الطور الصلب للبوليمر حسب افتراضات الباحث Ward هي :

$$P = \frac{\sigma_f(\varepsilon_f \cdot \varepsilon \cdot) * \varepsilon_f (1 + \mu \cot \alpha)}{\left[1 + m_o * \sigma_f(\varepsilon_f \cdot \varepsilon \cdot) * (1 - \varepsilon_f) * (1 + \varepsilon_f) * (1 + \mu \cot \alpha) \right]} \dots \dots \dots 8$$

١ الإضافات والتعديلات على معادلة الباحث Ward :

المعادلة (٨) للباحث Ward لم تأخذ بنظر الاعتبار الشغل الفائض (Redundant Work) وكذلك تأثير معدل الانفعال في أجهاد الأنسياب (σ_f) ، لذا فالباحث (Avitzer) [8] أفترض أن الشغل الفائض المصروف عند حدود بداية ونهاية القالب يعطي بالمعادلة :

$$W_R = 2K \left(\frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cot \alpha \right) \dots \dots \dots 9$$

$$K = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}}$$

لذا فأن معادله الشغل الفائض ممكن أن تكتب بالشكل التالي

$$W_R = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} \left(\frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cot \alpha \right) \dots\dots\dots 10$$

ولدراسة تأثير معدل الانفعال، فيعتبر أجهاد الخضوع داله للانفعال ومعدل الانفعال ($\epsilon_f \cdot \epsilon'$) ، لذا ، $\sigma_y = \sigma_f$ فمعادلة الشغل الفائض التي تتضمن أجهاد الأنسياب في بداية القالب ونهايته تكتب بالشكل التالي :

$$\begin{aligned} \text{بداية القالب } W_R &= \frac{\sigma_f \left(\epsilon_i \cdot \epsilon' \right)}{\sqrt{3}} \left(\frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cot \alpha \right) \dots\dots\dots 11 \\ \text{نهاية القالب } W_R &= \frac{\sigma_f \left(\epsilon_f \cdot \epsilon' \right)}{\sqrt{3}} \left(\frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cot \alpha \right) \end{aligned}$$

وبما إن إجهاد الأنسياب في بداية القالب ($\epsilon_i \cdot \epsilon'$) σ_f يمكن اعتباره مساويا للصفر [9] لذا فإن المعادلة (١١) ممكن أن تكتب بالشكل التالي :

$$W_R = \frac{\sigma_f \left(\epsilon_f \cdot \epsilon' \right)}{\sqrt{3}} \left(\frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cot \alpha \right) \dots\dots\dots 12$$

وبإضافة معادلة (١٢) الى معادله (٨) نحصل على معادلة حساب ضغط البثق نظريا والمعدلة عن معادلة الباحث Ward لحساب ضغط البثق للطور الصلب للبوليمر باستخدام نظرية الحد الأدنى ، وبالتالي فالمعادلة المعدلة النهائية لحساب ضغط البثق هي :

$$P = \frac{\sigma_f \left(\epsilon_f \cdot \epsilon' \right) \epsilon_f (1 + \mu \cot \alpha)}{\left[1 - m_o \sigma_f \left(\epsilon_f \cdot \epsilon' \right) \right] \cdot (1 - \epsilon_f) \cdot (1 + \epsilon_f) \cdot (1 + \mu \cot \alpha)} \dots\dots\dots 13$$

الجانب العملي:

١ البوليمر المستخدم في البحث :

أجريت الاختبارات على نوعين من البوليمرات هما البولي أثلين عالي الكثافة [HDPE] والبولي أثلين واطئ الكثافة [LDPE] لحساب ضغط البثق للطور الصلب للبوليمر باستخدام نظرية الحد الأدنى خلال القوالب المخروطية ، وتمتاز هذه البوليمرات بأنها لدنة حراريا وتحتاج الى درجات حرارية قليلة للتشكيل مقارنة بالأنواع الأخرى من البوليمرات أي أنها تحتاج الى ضغط بثق واطئ نسبيا وتمتاز أيضا بسهولة الحصول عليها كونها متوفرة في أغلب المعامل . وإمكانية الحصول على نسب بثق عالية باستعمالها .

٢ اختبار البثق

أجريت اختبارات البثق على جهاز الضغط (Instron – 1197) الذي قدرته (50 طن) وباستخدام زيت التشحيم (Grease oil – c 140) كماده مزيته وبعد التحضير وتهيئة الجهاز للبثق ، يأخذ قالب مخروطي معدني من مجموعه القوالب أنتسعه التي تظهر أبعادها في الجدول (1) والذي يعطي قيم التخصر وزوايا البثق . بعد تهيئة جهاز البثق (الذي يظهر بالرسم المبسط في ملحق البحث) يثبت على جهاز الضغط ويحمل الجهاز بسرعة مقدارها (٥ ملم / دقيقة) لرأس الجهاز أي بمعدل انفعال مقداره ($33 \times 10^{-4} / \text{sec}$) . ويتم حساب ضغط البثق العملي من العلاقة التي يرسمها الجهاز بين الحمل المسلط وحركة المكبس .

المناقشة:

من خلال تحليل النتائج العملية التي أجريت في البحث والتي تم فيها دراسة تأثير زاوية نصف القالب (α) ، ونسبة التخصر للبوليمر (R%) على ضغط البثق للبولي أثلين عالي الكثافة (HDPE) والبولي أثلين واطئ الكثافة (LDPE) ، ومقارنة هذه النتائج العملية مع النتائج النظرية لكل من المعادلة المعدلة (الجديدة) ومعادلة الباحث (Ward) باستخدام نظرية الحد الأدنى.

يظهر من الشكلين (١ ، ٢) زيادة الضغط اللازم لبثق البولي أثلين عالي الكثافة والبولي أثلين واطئ الكثافة مع زيادة نسبة التخصر (R%) عندما تكون قيمة زاوية نصف القالب (20°) ولمعدل انفعال ثابت مقداره ($33 \times 10^{-4} / \text{sec}$) . والسبب في ذلك يعود الى ان زيادة نسبة التخصر مع ثبوت قيمة زاوية نصف القالب (α) تعني زيادة سطح التلامس بين البوليمر وسطح القالب أي زيادة معدل الاحتكاك بين البوليمر وسطح القالب والذي يتطلب زيادة في ضغط البثق للتغلب على زيادة معدل الاحتكاك ، اضافة الى ان الزيادة في التخصر تعني زيادة الانفعالات أي زيادة مقاومة سلاسل البوليمر للتوجه باتجاه الحمل المسلط نتيجة زيادة التصليد الانفعالي والذي يؤدي الى زيادة إجهاد الانسياب المطلوب للبثق أي زيادة الضغط اللازم للبثق .

ويظهر من الشكلين أعلاه أيضا ان جميع نتائج حساب قيم البثق النظرية والعملية للبولي أثلين عالي الكثافة كانت أعلى من نتائج البولي أثلين واطئ الكثافة وبنسبه متوسطه مقدارها ٢١% وذلك لكون قيم إجهاد الخضوع وإجهاد الانسياب للبوليمر (HDPE) أعلى منها للبوليمر (LDPE) كما اكده الباحث [١٠] ، وذلك لأن الكثافة والوزن الجزيئي يكونان أعلى للبوليمر (HDPE) وهذه الزيادة تعني زيادة الروابط الجزيئية (Tie Molecules) بين جزيئات السلاسل ، والتي تقلل من قابلية البوليمر على التمدد لأنها تعمل كعوائق باتجاه الحمل المسلط وبالتالي تؤدي الى زيادة الاجهادات المطلوبة للخضوع والانسياب [١٠] .

ومن الشكلين السابقين نلاحظ أيضا ان النتائج النظرية للمعادلة الجديدة أعطت نسبة معدل اقتراب (96%) من قيم النتائج العملية مقارنة بالنتائج النظرية للباحث (Ward) والتي كانت نسبة اقترابها (92.9%) وهذا يعود الى حساب تأثير كل من معدل الانفعال في اجهاد الانسياب (σ_f) والشغل الفائض (W_R) في المعادلة الجديدة.

اما الشكلين (٣ ، ٤) واللذين يظهران العلاقة بين قيم الضغط اللازم لبتق البوليمرين (HDPE و LDPE) مع زيادة زاوية نصف القالب (α) بثبوت نسبة التخصر ($R\%$) وعند معدل انفعال ثابت مقداره ($33 \times 10^{-4}/\text{sec}$) نلاحظ نقصان قيم الضغط اللازم لبتق البوليمرين مع زيادة زاوية نصف القالب لغاية زاوية مقدارها (20°) وهذا النقصان في ضغط البثق ناتج ربما عن النقصان في قوى الاحتكاك الناتجة عن النقصان في مساحة سطح التلامس بين القالب والبوليمر أي ان عامل الاحتكاك هو المؤثر في هذه الحالة على الرغم من سهولة انسياب البوليمر ونقصان الشغل الفائض نتيجة قلة الألتواءات التي تحدث في منطقة القالب. اما بعد زاوية نصف قالب مقدارها (20°) نلاحظ زيادة الضغط اللازم للبتق مع زيادة قيمة الزاوية ، وذلك ربما يعزى الى زيادة الألتواءات التي تحدث نتيجة التغير بشكل حاد والحاصل في اتجاه البوليمر داخل القالب مما يؤدي الى زيادة الشغل الفائض وهذا يؤدي الى زيادة قيم ضغط البثق وهذا يعني ان افضل قيمة لزاوية البثق (20°) لانها تعطي اقل قيمة للضغط اللازم .

ويظهر من الشكلين أيضا ان حساب قيم الضغط النظرية للمعادلة الجديدة تعطي نسبة اقتراب تصل الى (92%) من النتائج العملية مقارنة بالنتائج النظرية للباحث (Ward) والتي تعطي معدل نسبة اقتراب مقدارها (84.4%) من النتائج العملية.

تظهر دراسة معدلات نسب الاقتراب ان نسبة الاقتراب بزيادة نسب التخصر تكون متقاربة لنتائج المعادلة الجديدة مقارنة بمعادلة الباحث (Ward) اذ نسبة التباين بينهما هي ٤,٩٢ % ، بينما مع زيادة زاوية نصف القالب يكون هنالك تباين واضح في نسب الاقتراب اذ تصل نسبة التباين بينهما الى ٩,٢٦ % وهذا يعني ان اضافة الشغل الفائض (W_R) في المعادلة الجديدة يكون تأثيره اكثر وضوحا بزيادة زاوية نصف القالب مقارنة بنسب التخصر.

الاستنتاجات :

من خلال البحث تم التوصل الى الاستنتاجات التالية :

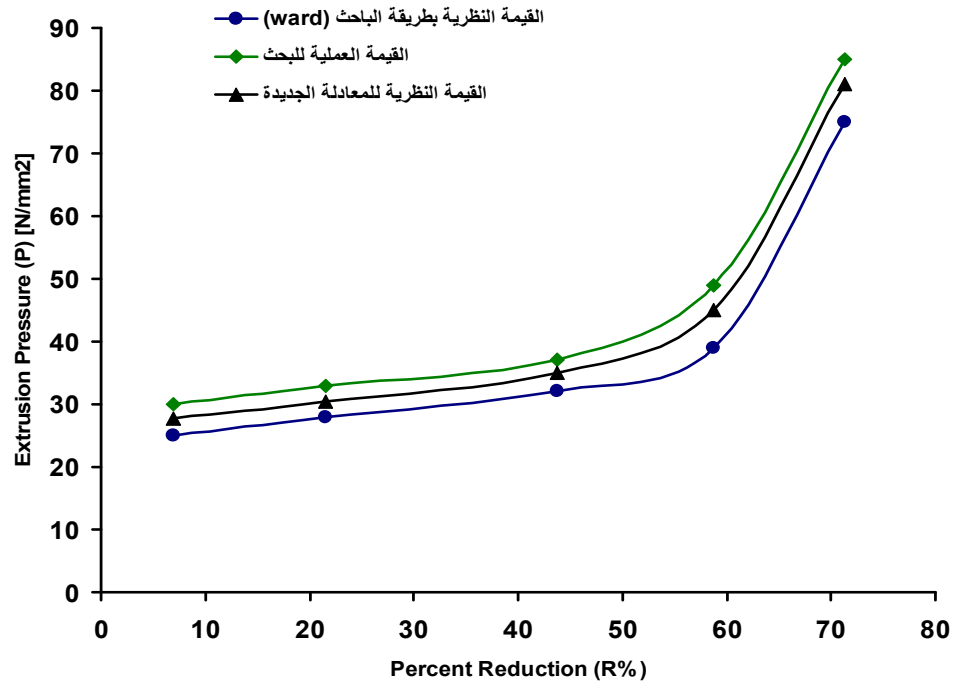
١. نتائج حساب قيم ضغط البثق النظرية بالمعادلة الجديدة المعدلة رقم (١٣) تكون اكثر اقترابا من النتائج العملية مقارنة بالنتائج النظرية للباحث (Ward) المعادلة رقم (٨).
٢. تأثير اضافة الشغل الفائض (W_R) على المعادلة الجديدة يكون اوضح مع زيادة زاوية نصف القالب (α°) اذ تصل نسبة التباين مقارنة بمعادلة (Ward) الى ٩,٢٦ % اما مع زيادة نسبة التخصر ($R\%$) تكون نسبة التباين ٤,٢٢ % .
٣. ان ضغط البثق النظري والعملي للبولي اثيلين اعلى الكثافة اعلى منه للبولي اثيلين واطى الكثافة وبنسبه متوسطه مقدارها ٢١ % .
٤. افضل زاوية لنصف القالب المخروطي عند بثق البوليمرين (HDPE و LDPE) كانت عند زاوية مقدارها (20°) وبمعدل انفعال ثابت مقداره ($33 \times 10^{-4}/\text{sec}$) .
٥. زيادة قيم الضغط اللازمة لبتق البوليمر النظرية والعملية مع زيادة نسب التخصر.

الجدول (١) يوضح قيم زاوية نصف القالب ونسبة التخصر للقوالب المستخدمة في البحث

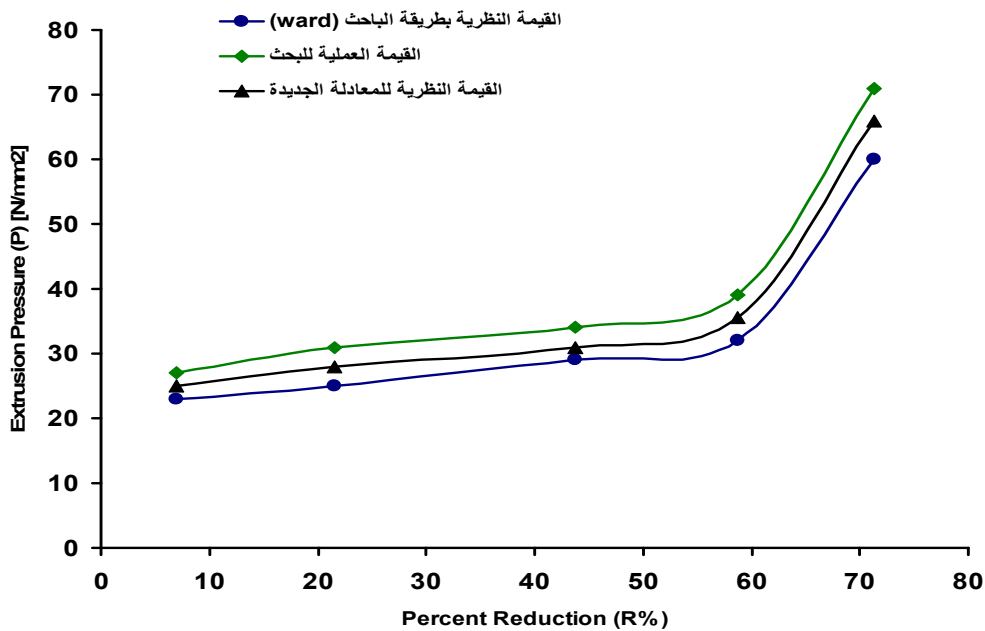
زاوية نصف القالب (α°)	نسب التخصر (R%)	القطر النهائي للمنتوج (d _f) _{mm}	القطر الابتدائي (d _o) _{mm}	رقم القالب
7.5	43.7	10.5	١٤	١
15	43.7	10.5	١٤	٢
20	43.7	10.5	١٤	٣
25	43.7	10.5	١٤	٤
30	43.7	10.5	١٤	٥
20	7.01	13.5	١٤	٦
20	21.5	12.4	١٤	٧
20	58.7	9.0	١٤	٨
20	71.3	7.5	١٤	٩

المصادر:

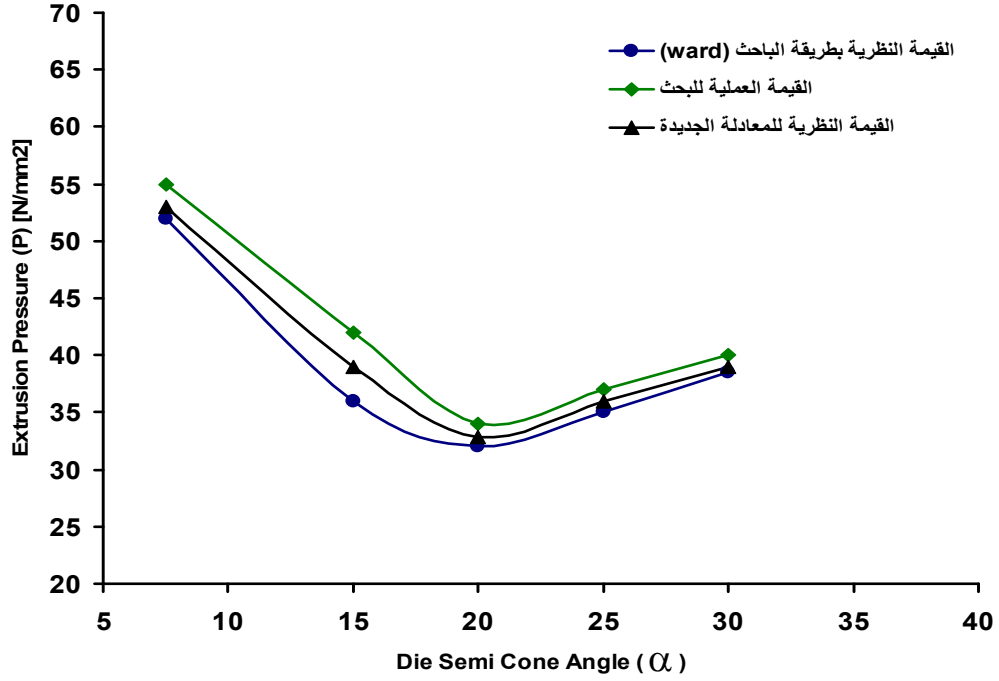
- 1.J.Vachopoulos " Introduction of plastic processing " Mc Master University , Hamilton , pp 1- 3 , 2001.
- 2.M. Gallant, H. A. Bruck and A. K . Kot a " Fabrication of particle – reinforced Polymers with continuous Gradient Architectures using Twin screw Extrusion Process" J. of composite materials , VOL . 38 , NO . 21 , pp 1873 – 1893 , 2004 .
- 3.R. Mudalamane and D. I . Bigio " Process Variations and the Transient Behavior of Extruders " AICHE Journal , VOL .49, No . 12 , pp 3150 – 3160, 2003 .
- 4.C.Rodriguez , O. Estrada , W.FLopez and M.P.Noriega "Polymer Extrusion Dies Modeling and Design using Gid and MCAD Systems " university of Medellin , Colombia , 2002
- 5.Patrick D.A, Joseph D., Han E.H. " Viscoelastic effects in multilayer Polymer extrusion " Applied Rheology , VOL .16 , PP 198 – 205, 2006
- 6.O. Hoffman and G.Sachs " Introduction to the theory of plasticity " Cmc Graw – Hill , New york and London , 1953 .
- 7.I.Ward " Analysis of solid – state extrusion process of polymeric materials " Int . J . Polymeric uatev, VOL . 2 , PP 23 – 28 , 1974 .
- 8.B. Avitzur and W . pachla " the upper bound approach to plane strain proplems using linear and rotational Velocity field – part . 1: base concepts " J. Eng for industry , VOL . 108 , pp 295 – 306 , 1986.
9. L .I. D . Pugh , " Mechanical Behavior of materials under pressure" , (Elsevier , Amsterdam) , 1970 .
- 10.Alkinson and Gbrinson, " High Strength Polymers " , J. Metals From , V.7,No.3, PP 131– 142. 1984.



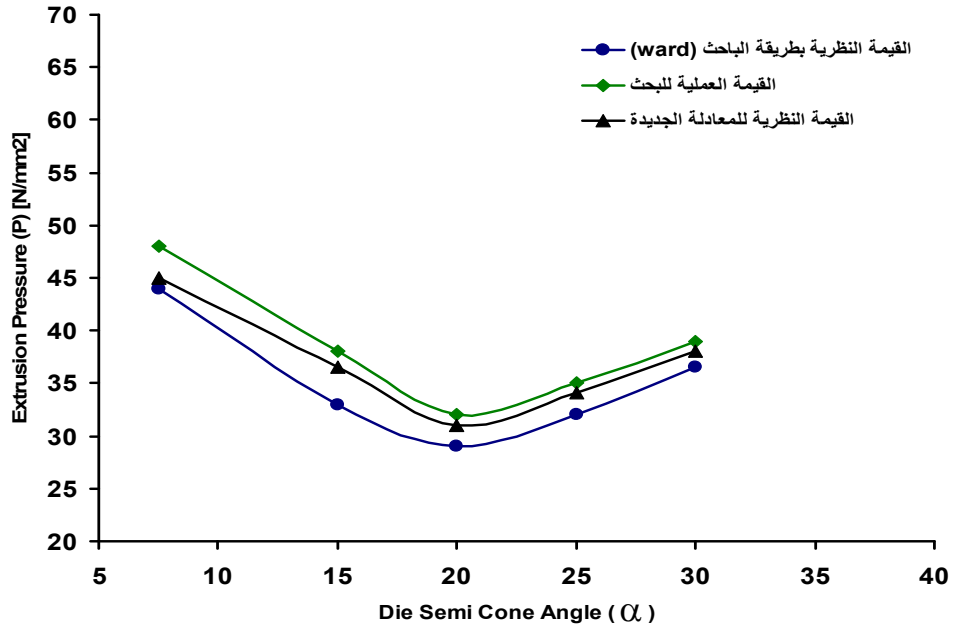
الشكل رقم (١) العلاقة بين ضغط البثق ونسبة التخصر للنتائج العملية والنظرية بطريقة الباحث (ward) والمعادلة الجديدة للبولي اثلين عالي الكثافة لزاوية قالب مقدارها (٢٠°) وبمعدل انفعال ($33 \times 10^{-4} / \text{sec}$)



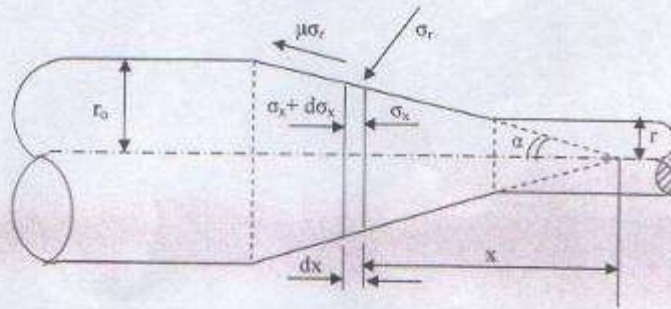
الشكل رقم (٢) العلاقة بين ضغط البثق ونسبة التخصر للنتائج العملية والنظرية بطريقة الباحث (ward) والمعادلة الجديدة للبولي اثلين واطى الكثاف لزاوية قالب مقدارها (٣٠°) وبمعدل انفعال ($33 \times 10^{-4} / \text{sec}$)



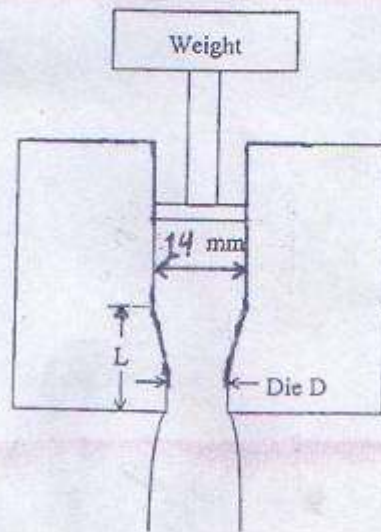
الشكل رقم (٣) العلاقة بين ضغط البثق وزاوية نصف القالب للنتائج العملية والنظرية بطريقة الباحث (ward) والمعادلة الجديدة للبولى اثلين عالى الكثافة وبمعدل انفعال ($33 \times 10^{-4}/\text{sec}$)



الشكل رقم (4) العلاقة بين ضغط البثق وزاوية نصف القالب للنتائج العملية والنظرية بطريقة الباحث (ward) والمعادلة الجديدة للبولى اثلين واطى الكثافة وبمعدل انفعال ($33 \times 10^{-4}/\text{sec}$)



القوى المؤثرة على شريحة البوليمر خلال الجزيء المسلوب من القالب



مخطط مبسط لجهاز البثق