المجلة الدولية للهندسة وتقنية المعلومات
journal homepage:www.ijeit.misuratau.edu.ly
IJEIT
جامعة مصراتة MISURATA UNIVERSITY

تقييم عبوة بلاستيك (PET) سعة 7 لترات من خلال نمذجة العناصر المحدودة

علي محمد الغويل
كلية التقنية الصناعية،قسم الهندسة الصناعية،مصراته،
Ali75lby@cit.edu.ly

الملخص— **في السنوات الأخيرة، أصبحت المياه المعبأة مصدرا رئيسيا ولايمكن الإستغناء عليه لمياه الشرب وخاصة في المدن، حيث تعبأ المياه بعد تنقيتها ومعالجتها في قنينات بلاستيكية مختلفة الأحجام والمصنعة من مادةالبولي إثيلين تريفيتلات (polyethylene terephthalate) PET بسبب صلابته وشفافيته وخصائصه الكيميائية. حيث تعرض القنينات لظروف الضغط أثناء نقلها وتخزينها شائع جدا ويمكن أن يكون مصاحب بتشوهات تضر بشكل القنينة ومحتواها. ولإختيار وزن القنينة المناسب والإقتصادي (وزن المصبع)، تم في هذا البحث دراسة مقاومة الإنبعاج(Buckling) تحت تأثير حمل عمودي باستخدام طريقة العناصر المحدودة (FEM) لقنية ذات شكل دائري بالأوزان التالية 70،75، 83 جرام. وفقًا للنتائج التي تم الحصول عليها باستخدام برنامج Abaqus ، يمكننا إختيار وزن المصبع (Preform) المناسب للقنينة من أجل زيادة مقاومة حمل لإنبعاج بأقل وزن ممكن للإستفادة من الناحية المادية وأقل ضررا على البيئة. حيث أظهرت النتائج المتحصل عليها بأن القنية دائرية الشكل بوزن 70 جرام مقاومةللأحمال العمودية بدرجة كافية وأقل تلوث للبيئة مقارنة بالأوزان الأخرى.**

الكلمات المفتاحية: **مادة PET ، مقاومة الإنبعاج، وزن القنينة، Abaqus**

1. المقدمة

بسبب محدودية مصادر المياه الصالحة للشرب في المناطق الشمالية من ليبيا وزيادة الإستهلاك البشري لها إستوجب ذلك البحث عن بدائل لتوفر المياه الصالحة للشرب[1، 2]، وكأحد الحلول لتخفيف هذا النقص أستعملت تقنيات التحلية في المدن، حيث تعتبر التحلية بطريقة الأغشية (التناضح العكسي) أكثرها شيوعا. ولسد هذا العجز أسست المصانع والشركات الخاصة لتعبئة المياه لتلبية الإحتياجات اليومية للسكان من مياه الشرب وذلك من خلال تعبأتها للمستهلك مباشرة أو توزيعها على المحلات التجارية في قنينات بلاستيكية مصنوعة من مادة الـ PET مختلفة الأحجام (18 ،15 ،10 ، 7 ، 1.5، 0.5، 0.33 لتر). بشكل عام، نتيجة للتكديس (Stacking) والنقل (Transportation) من المصنع إلى نقاط التوزيع تتعرض هذه العبوات البلاستيكية لحمل ضغط محوري، حيث يعتبر هذ الحمل أهم عنصر في فشل عبوات المياه حيث تفقد العبوة صلابتها تحت هذا الضغط وتنحرف عن وضع التوازن وتخسر القدرة على التحمل[3] وفي نفس الوقت يحدث الإنبعاج للعبوة[4]. يطلق على الضغط المحوري المسلط على زجاجة البلاستيكية حمل الإنبعاج ويمكن حسابه بطريقة العناصر المحدودة[5]. الشكل الهندسي للقنينة وتوزيع مادة البلاستيك على جدرانها هما العاملان الرئيسيان المؤثران على الضغط الرأسي وفقًا للعديد من الاختبارات، حيث أن زيادة سمك الجدار ينتج عنه زيادة في وزن القنينة؛ وبالتالي إرتفاع تكلفة المنتج وزيادة الضرر البيئي وعليه يجب أن تنتج القنينة بأقل وزن ممكن مع الحفاظ على أداء وظيفتها[3].

استلمت الورقة بالكامل في 17 سبتمبر 2022 وروجعت في 10 اكتوبر 2022 وقبلت للنشر في 22 اكتوبر 2022

ونشرت ومتاحة على الشبكة العنكبوتية في 25 اكتوبر 2022

في المصانع الخاصة (في ليبيا) بنفخ القنينات ذات سعات 7، 10 لترات يتم تصنيع شكل قالب النفخ للقنينة (سابقا في الصين ولكن منذ حوالي 3 سنوات بدأ تصنيعها محليا بعد توفر المعدات الحديثه لتصنيع القوالب في البلاد من خلال القطاع الخاص) على قرار من مالك المصنع، حيث يعتمد إختيار الشكل على خبرة المالك في المجال الصناعي ،أو على شكل قنينات موجوده في السوق أوعلى الأشكال المتوفرة من خلال مواقع الإنترنت مع إحداث بعض التغييرات أحيانا دون إجراء أي محاكاة للمنتج أو إجراء بعض الإختبارات (إذا كان المنتج متوفرفي السوق) قبل تصنيع القالب فعليا لمعرفة مدى تلبيته لظروف الإستخدام والنقل. حيث أنه من الممكن الإستفادة من البرامج الهندسية المتوفرة اليوم بكثرة لمحاكاة المنتج قبل الدخول في مرحلة التصنيع الفعلية لتفادي أي قصور في أداء المنتج.

Qingchun وآخرون إستخدموا FEM بواسطة برنامج Abaqus لتحليل تحمل العبوات للضغوط المصنعه من أجلها وبأوزان خفيفة[3]. Gulati وآخرون إقترحوا إستخدام طريقة العناصر المحدودة لدراسة النمذجة السريعة لقوالب النفخ لتصنيع قنينات مصنعة من مادة الـ PET[6]. في دراسة أخرى قام بها Naemsai وThongkaew تم فيها دراسة بعض المتغيرات التي تؤثر على شكل قنينة ذات سعة 6لتر مصنعة من مادة الـ PET بإستخدام طريقة العناصر المحدودة وطريقة الإستجابة السطحيه (Response surface method)من أجل الوصول الى الشكل المثالي للقنينة[7]. كما درس بعض البحاث تأثر خواص مادة البولي إيثلين تريفيتلات أثناء عملية التشكيل بالنفخ(القولبه)، حيث قام Demirel وDaver بفحص كيفية توزيع المادة البلاستيكية على جدار القنينة بعد عملية النفخ وكذلك مقاومة المنتج للحمل المحوري عند عدة متغيرات لعملية النفخ[8]. في هذا البحث تم إختيار برنامج Abaqus لدراسة الحل العددي والتجريبي لإعطاء معلومات كاملة عن تشوه قنينة البلاستيك المصنعة من مادة البولي إيثيلين تريفيتلات تحت تأثير حمل خارجي مع تغيير وزن القنينة.

2. المنهجية

تتمثل الخطوات الأساسية في إنشاء نموذج هندسي (CAD file) لشكل قنينة البلاستيك المستهدفه في هذا البحث بواسطة برنامج سوليدووركس Solidworks، تم إستيراد هذا الملف بصيغة (STA) إلي برنامج Abaqus وإدخال خواص المادة البلاستيكية المستخدمة في إنتاج القنينة والموجودة في بعض الدراسات السابقة كما هو موضح بالقسم 1.2. تم تحديد سمك جدار القنينة لكي يعطي الوزن المطلوب (حيث تم قياس سمك جدار القنينة بواسطة برنامج السوليدووركس)، تعريف أسطح القنينة واللوح العلوي والسفلي وإختيار معامل إحتكاك مناسب بقيمة 0.1 بين الألواح والقنينة [3]، تطبيق الحدود (Boundary condition) التي تحاكي ظروف إستخدام القنينة في الواقع لكي تكون جاهزة للتحليل الديناميكي.

1.2 خواص المادة:-[9]

1.1.2 الخواص العامة :- الكثافة 1335 كجم/ م^3

2.1.2 الخواص المرنة في شكل ثوابت هندسية

جدول رقم (1). الخواص المرنة

E_1(Mpa)	1345.39
E_2(Mpa)	1254.74
E_3(Mpa)	1254.74
V_{11}	0.4
V_{22}	0.4
V_{33}	0.4
G_{12}(Mpa)	448.12
G_{23}(Mpa)	480.05
G_{33}(Mpa)	448.12

3.1.2 *الخواص اللدنه:-*

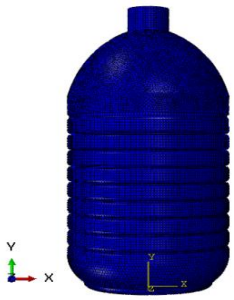
جدول رقم (2) الخواص اللدنه

الخواص اللدنة	إجهاد الخضوع(Mpa)
0	75.49
0.928	155.26

2.2 نمذجة الشكل الهندسي للقنينة:-

صمم النموذج الهندسي لقنينة المياه عبوة 7لتر بواسطة برنامج سوليدووركس (Solidworks) كما هو موضح بالشكل رقم (1). حيث لا توجد تفاصيل عن القلاووظ على عنق القنينة لأنه ليس له أي تأثير لمحاكاة اختبار الحمل العلوي لتصميم شكل القنينة[10].

يصف الشكل الهندسي لقنينة المياه التي يمكن أن تحتوي على 7لتر من السوائل الصالحة للشرب. يعد إجراء تحليل الحمل العلوي أمرًا مهمًا لتحديد الصلابة الرأسية للقنينة، هذا الحمل العلوي مهم أيضًا لتحديد قدرة التكدس الرأسي، حيث يمكن إجراء حمل الضغط بسائل أو بدون سائل، مع أو بدون غطاء مغلق. في هذا البحث، قمنا بإعداد حمل ضغط بدون سائل و بدون غطاء. (لذلك لا يوجد ضغط داخلي)[11].

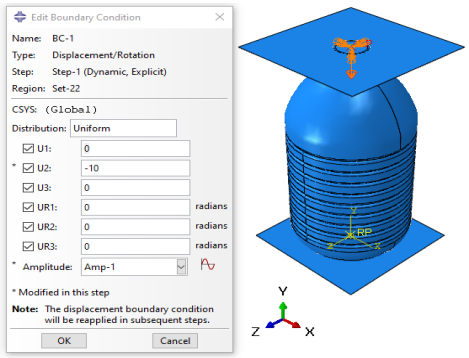


شكل رقم (1). قنينة 7 لتر

3. تحليل العناصر المحدودة

تم إستخدام طريقة تحليل العناصر المحدودة لتقييم أداء قنينة 7لترمع التغيير في وزن المصبع (preform) المستخدم كمادة خام لتشكيل القنينة، حيث أستخدام البرنامج الهندسي Abaqus 6.9 كأداة لتحليل العناصر المحدودة Finite element analysis (FEA) في هذا البحث لمحاكاة تأثير الحمل العلوي. تم تطبيق إزاحة سفلية للوح العلوي عند نقطة مرجعية (reference point) بمقدار يساوي 10ملم [3]، اللوح العلوي مقيد من الحركة والدوران في جميع الإتجاهات ماعدا الحركة الرأسية في إتجاه محورY، بالنسبة للوح السفلي ثابت و مقيد الحركة والدوران في جميع الإتجاهات كما هو موضح بالشكل رقم 2.

من خلال تقنية توليد الشبكة الذاتي والمتاحة في البرنامج الهندسي Abaqus [3]، تم تشبيك (mesh) القنينة بعدد 37218 جزء (بعد تجربة عدة محاولات وإستقرار النتائج عند هذا العدد). أخيرا، تم تكوين (job) الملف الخاص بالعينة وتسليمه للبرنامج للتحليل الديناميكي الغير خطي An explicit dynamic non-linear computation)

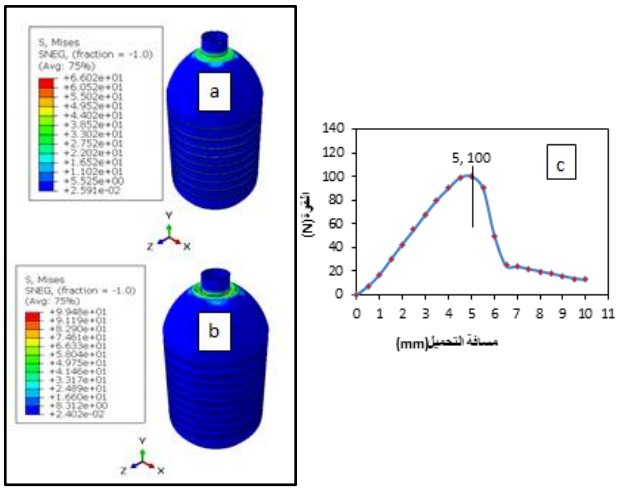


شكل رقم (2). تطبيق مسافة 10ملم على اللوح العلوي

4. النتائج والمناقشة

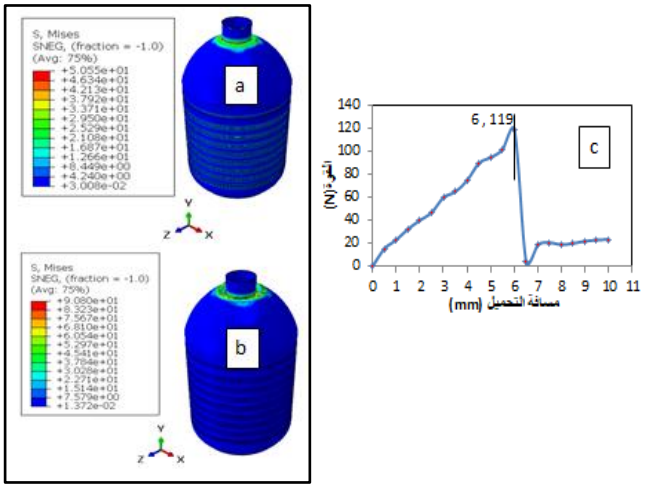
أجريت محاكاة نموذج قنينة المياة ذات عبوة 7لترات بإستخدام المعلومات والمواد المحددة والمذكورة سابقا. حيث تم التحميل العلوي على نموذج القنينة فارغاً كما هو مبين بالشكل رقم (2). أستخدمت ثلاث قيم مختلفة لسمك جدار القنينة لتعبر عن أوزان المصبعات المستهدفة في هذه الدراسة (70، 75 و83 جرام) والتي تستخدم فعليا في صناعة العبوات بالسوق المحلي. من خلال النتائج التي تم الحصول عليها لوحظ تغيرا في مقاومة العبوة للحمل العلوي كما هو موضح بالأشكال التالية للأوزان الثلاثة:-

4-1 *نموذج لقنينة ذات وزن 70جرام*



شكل رقم (3) توزيع الإجهادات ومنحنى قوة التحميل عند منتصف ونهاية المحاكاة لوزن 70 جرام

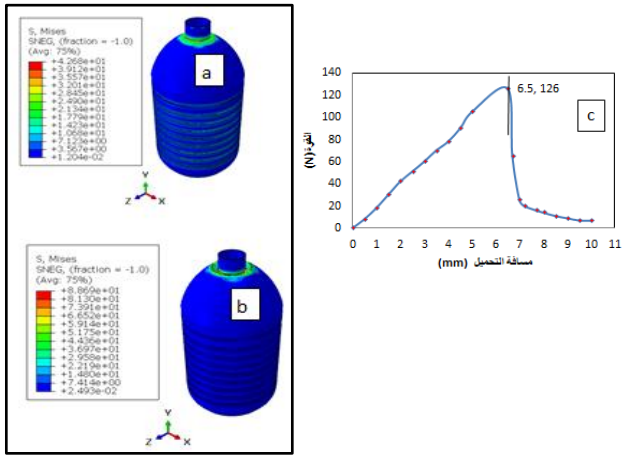
4-2 *نموذج لقنينة ذات وزن 75 جرام*



شكل رقم (4) توزيع الإجهادات ومنحنى قوة التحميل عند منتصف ونهاية المحاكاة لوزن 75 جرام

كما هو واضح من الأشكال 5(a),4(a),3(a) للحالات الثلاثة أن المنطقة التي تتركز حولها أكبر قيمة للإجهادات هي المنطقة العلوية الملاصقة مباشرة لعنق القنينة (القلاووظ) والسبب في ذلك هو التغير المفاجئ في تصميم أبعاد القنينة. إن أكبر قيمة للإجهادات في الحالات الثلاثة هي 66 و50 و42 ميجا باسكال على التوالي للأوزان 70، 83,75 جرام عند مسافة ضغط 6.5,6,5 ملم.

3-4 نموذج لقنينة ذات وزن 83 جرام



شكل رقم (5) توزيع الإجهادات ومنحنى قوة التحميل عند منتصف ونهاية المحاكاة لوزن 83 جرام

حيث تقل هذه القيم عن إجهاد الخضوع للمادة المصنع منها القنينة (75 ميجاباسكال) أي أن المادة في منطقة التشوه المرن(elastic deformation)، حيث يكون التشوه الناتج مؤقت يزول بزوال القوة المؤثرة وترجع القنينة لشكلها الأصلي. من الواضح جدا أن قيمة الإجهادات تقل كلما زاد وزن القنينة وبالتالي زيادة سمك القنينة، السبب أنه في حالة السمك الأقل تتركز الإجهادات في منطقة واحدة على القنينة بينما تتوزع الإجهادات على أكثر من منطقة على جدار القنينة في حالة زيادة السمك [12].

بزيادة مسافة التحميل تدريجيا إلى القيمة القصوى 10ملم تزداد قيم الإجهاد لتصل الى 99.5 و90.8 و 88.7 ميجا باسكال على التوالي للوزن الأقل فالأكثر كما هو واضح في الأشكال 5(b), 4(b),3(b) وكل منها أعلى من قيمة إجهاد الخضوع لمادة القنينة (75 ميجا باسكال) أي أن التشوه يكون دائم حتى بعد زوال الحمل (Plastic deformation) وتفقد عبوة المياه شكلها الأصلي نتيجة للحمل المسلط.

الأشكال 5(c),4(c),3(c) توضح قيم رد فعل القنينة كنتيجة للإزاحة في محور(Y) وكانت القيم كما موضحة بالجدول رقم 3

جدول رقم (3) الإزاحة العمودية مقابل القوة

وزن القنينة	70جرام	75جرام	83جرام
الإزاحة العمودية (ملم)	5	6	6.5
أقصى قيمة للقوة (نيوتن)	100	119	126

من الجدول السابق نلاحظ أنه كلما زاد سمك القنينة (بزيادة وزن المصبع) تزداد قيمة أقصى قوة تتحملها القنينة قبل الفشل، حيث يعتمد الأداء العام للقنينة على قوة جميع مناطق الزجاجة حيث تنتقل الضغوط على كامل سطح القنينة، لكن التشوه الفعلي والأكبر للقنينة يبدأ أسفل منطقة العنق حيث التغير الكبير في أبعاد القنينة.

الخلاصة

أجريت هذه الدراسة على نموذج ثلاثي الأبعاد لقنينة ذات عبوة 7لتر المصنعة من مادة البولي إيثيلين تريفيتلات (PET) والمستخدمة لتعبئة مياه الشرب، وذلك بمحاكاة النموذج تحت تأثير حمل محوري بإستعمال البرنامج الهندسي Abaqus بأوزان مختلفة للقنينة للحصول على أفضل وزن يتحمل الضغط المحوري أثناء النقل والتكديس. حيث كانت نتائج التحليل العددي تدعم الخلاصة التالية:-

1- يمكن التبؤ بالوزن المناسب المستخدم في إنتاج قنينات تلبي الغرض المصنع من أجله وذلك من خلال الإستعانة بالبرامج الهندسية مثل Abaqus لمحاكاة ظروف الإستخدام.

2- تتركز الإجهادات الناتجه من الحمل العمودي عند منطقة العنق وذلك بسبب التغير الكبير والمفاجئ في الأبعاد مما يسبب انبعاج القنينة في هذه المنطقة.

3- كلما كان سمك جدار القنينة متساوي كانت قابلية العبوة أفضل لتحمل الأوزان الخارجية دون الوصول لحالة الفشل.

التوصيات

نظرا لوجود سوق كبير للعبوات المصنعة من مادة الـ PET محليا، فعليه نوصي بزيادة الضرائب على إستيراد المواد الخام لكي يلجأ المصنعين لإستهلاك أوزان أقل مايمكن لتصنيع القنينات.

1- إستخدام معدات آلية لتعبئة القنينات البلاستيكية بدلا من التعبئيه اليدوية لما لها من مميزات كإضافة غاز النيتروجين للقنينة أثناء التعبئة مما يجعل القنينة متماسكة وتتحمل النقل والتكديس دون الضرر بالمنتج مع وزن مصبع أقل.

2- الإستعانة بالبرامج الهندسية المتوفره لمحاكاة أشكال القنينات قبل إنتاجها فعليا لتحديد أفضل تصميم للقنينة من حيث الأداء مما يوفر مادة خام وبالتالي أقل تلوث بيئي وسعر بيع أرخص للمستهلك.

3- دراسة بعض التصاميم الهنسية لأشكال مختلفة للقنينة (دائري مربع، ...) وتأثير مقاسات القنينة على قابليتها لمقاومة الأحمال العمودية بنفس وزن المصبع.

المراجع

1. عزالدين محمد أبوقصة، نوري الساحلي مادي. مؤشرات التلوث الميكروبي في عبوات المياه المعبأة سعة 18لتر المتداولة في مدينة طرابلس وضواحيها. المجلة الليبية للعلوم الزراعية.2011 17: 67-60 p.

2. ميلاد شقلوف، أحمد محمد عبدالله و رمضان اجعيكه. دراسة بعض الدلائل عن جودة مياه الشرب المعبأة في مدينة مصراته، ليبيا. مجلة علوم البحار والتقنيات البيئية. 2018. 4: p. A53 - A68.

3. Hu, Q.C., et al. Structural optimization and lightweight design of PET bottle based on ABAQUS. in Advanced Materials Research. 2012. Trans Tech Publ.

4. Wu Lian-yuan, et al. Shell theory. Jiaotong University Press, 1989.

5. Li Yan-hui, H.Q. Analysis about the Axial Pressure Critical Load of PET Bottle Based on ABAQUS. Packaging Engineering, 2009. **30**: p. 18-20.

6. Gulati, V., et al. Parameterized modeling of blow-moulds for designer PET bottles. 2010. **7**(4): p. 479-487.

7. Thongkaew and NaemsaI , Mechanical Properties and Cost-Minimized Design of 6-liter PET Bottle Using Finite Element Method. 2020. **17**(6): p. 579-587.

8. Demirel, B. and F. Daver. Simulation of stress distribution in the base of pet bottles under different processing conditions. in Proceedings of the Europe/Africa Regional Meeting of the Polymer Processing Society for 2009 Conference. 2009. Polymer Processing Society.

9. Harshath, C., et al ،Buckling Evaluation of a Plasti Bottle Design. 2018. 5(10): p. 549-553.

10. Keawjaroen, P. and C. Suvanjumrat. A master shape of bottles for design under desirable geometry and top load test. in MATEC Web of Conferences. 2017. EDP Sciences.

11. https://info.simuleon.com/blog/how-to-simulate-top-load-squeeze-load-and-crush-load-for-plastic-bottle?success=true.

12. Vaidya, R., Structural analysis of poly ethylene terephthalate bottles using the finite element method. 2012: Oklahoma State University.