دراسة طرق وأساليب تخفيض قوة مقاومة الهواء على العربات باستخدام الحاسوب

تمام أحمد شاهين*، سليم عيد خضور ،مصطفى عبد القادر عجاج*****

* طالب دراسات عليا (ماجستير)، كلية الهندسة الميكانيكية، أكاديمية الأسد للهندسة العسكرية

** مدرس، كلية الهندسة الميكانيكية، أكاديمية الأسد للهندسة العسكرية

الملخَّص

تعتبر قوة مقاومة الهواء أكبر قوة معيقة لحركة العربة وخاصةً في السرعات العالية، لذا كان لتخفيضها أهمية كبيرة لدى الشركات الصانعة للعربات، التي قامت بإجراء دراسات كثيرة لتحسين الشكل الانسيابي للعربات وتطورت الدراسات والأبحاث على مر التاريخ للوصول الى أفضل شكل انسيابي يحقق الغاية المطلوبة.

تم في هذا البحث دراسة تأثير التعديل الذي يمكن إجراؤه على عربة شاحنة غاز66 على قوة وعامل مقاومة الهواء باستخدام برنامج حاسوبي SolidWorks بإجراء عملية محاكاة افتراضية ضمن حزمة الـ FlowSimulation، وتم التوصل لنموذج معدل للعربة غاز66 حقق زيادةً في السرعة العظمى للعربة بنسبة تصل إلى 4% تقريباً.

الكلمات المفتاحية: قوة مقاومة الهواء على العربات، عامل مقاومة الهواء والشكل الانسيابي، أيروديناميكية جسم عربة غاز66.

ورد البحث بتاريخ2022/6/21

قبل للنشر بتاريخ 2022/7/7

1- مقدمة:

قوة مقاومة الهواء هي قوة معاكسة لاتجاه حركة العربة وتعتبر أكبر قوة معيقة لحركتها وخاصة عند السرعات العالية وتتشكل نتيجة احتكاك واصطدام جزيئات الهواء بسطوح العربة وضغطها على جسم العربة ومن جراء تشكيل الاضطرابات الهوائية في بعض مناطق تلاقي الهواء وسطح العربة الخارجي، يمكن التخفيف من قوة مقاومة الهواء بتغيير عامل مقاومة الهواء (عامل الكبح الأيروديناميكي) وذلك بإجراء تحسين في انسيابية شكل العربة وذلك إما بالتعديل على التصميم العام للعربة أو بإضافة آليات خاصة تعمل على تحسين انسيابية شكل العربة.

2- أهمية البحث وأهدافه:

إن أهمية البحث تكمن في دراسة أثر التغير في انسيابية العربة على معامل الشكل الانسيابي، وبالتالي تغيير قوة مقاومة الهواء وذلك من خلال بناء نماذج حاسوبية للعربة المدروسة ضمن بيئة SolidWorks بغرض إجراء محاكاة حاسوبية على هذه النماذج، ومن ثم اختيار النموذج الأفضل من الحلول التصميمية على العرب الذي يحقق أقل قيمة ممكنة لقوة مقاومة الهواء بهدف تحسين أداء واقتصادية العربة (تخفيض استهلاك الوقود).

3- طريقة البحث:

تضمنت منهجية البحث:

1- دراسات مرجعية تحليلية لطرق دراسة تأثير قوة مقاومة الهواء على العربات وطرق وآليات التخفيف من هذه القوة.

2- دراسة تصميمية لنماذج العربة "غاز 66" مع إضافة آليات خاصة ومحاكاتها حاسوبياً باستخدام بيئة SolidWorks.

4- الدراسات المرجعية:

تم من خلال عدد من الدراسات والأبحاث المنشورة المتعلقة بموضوع البحث استعراض تأثير قوة مقاومة الهواء على العربات والطرق المستخدمة في تخفيف تلك القوة.

قام [1] باستعراض وتبيان القوى الخارجية المؤثرة على العربات ومدى تأثيرها وتحدث عن تأثير قوة مقاومة الهواء كقوة معيقة لحركة العربة والعوامل المؤثرة عليها والقوانين المستخدمة في حسابها ومجالات قيم عامل مقاومة الهواء لنماذج العربات المختلفة.

قامت [2] بدراسة تأثير إغلاق فتحات التبريد على مقاومة الهواء وأثرها على استهلاك الوقود للعربة الشاحنة فولفو FH16 وتبين أن إغلاق فتحات التهوية الأمامية للمبرد قلل استهلاك الوقود بنسبة 2.3%.

قام [3] بدراسة تأثير الإضافات على الشكل الخارجي على قوة مقاومة الهواء لنموذج مصغر لعربة شاحنة ضمن نفق هوائي، وتبين أن هذه الإضافات تحسن الانسيابية وتعمل على تخفيض مقاومة الهواء بنسبة حوالي 26%.

قام [4]، بدراسة أيروديناميك العربات وذلك باستخدام نماذج مصغرة لعربات ضمن نفق هوائي وأظهر الإيجابيات والسلبيات التي يمكن تلافيها بإضافة آليات تساعد على التخفيف من قوة مقاومة الهواء، والتي بدورها تساعد على تحسين أداء العربة، وتخفف من استهلاك الطاقة، وتعطي العربة جاذبيةً وجمالاً ورغبةً لدى المستثمرين.

قام [5]، بدراسة طبيعة الجريان الهوائي المتبادل عند تجاوز العربات السياحية للعربات الشاحنة على الطرقات ذات الاتجاهين، وذلك في حالتي التجاوز وفق اتجاه واحد أو اتجاهين متعاكسين، وتمت الدراسة عن طريق المحاكاة باستخدام الحاسوب وباستخدام النفق الهوائي أيضاً، وأظهرت الدراسات أن القوى الأيروديناميكية التي تتعرض لها العربة السياحية تزداد بمعدّل تسعة أضعاف عند تجاوزها لعربة

شاحنة كبيرة ولكن مدة هذه التقلبات في القوة أصغر من أن تخلق قوة دفع كبيرة في العربات أو يؤثر على استقرارها.

بيّن [6]، تأثير شكل كل من مقدمة العربة ومؤخرتها (القاع) على قوة مقاومة الهواء حيث أن مساحة سطح المقدمة العمودي (الجبهي) على تيارات الهواء يلعب دوراً كبيراً في زيادة وإنقاص مقاومة الهواء، وأوضح بأن نسبة قوة مقاومة الهواء تجريبياً تشكل حوالي 0.6 من القوة المحسوبة نظرياً $\rho.A.v^2$.

خلاصة الدراسات المرجعية: إن استخدام النفق الهوائي يتطلب تصميم نموذج حقيقي أو مصغر للعربة وإجراء القياسات عليه ضمن النفق، ومن ثم إجراء التعديل المطلوب وهذا الأمر يتطلب تحقيق التشابهات الهندسية والجريانية، ولتفادي تلك التعقيدات فقد تم اللجوء الى الحاسوب لإجراء دراسات عددية (كنفق افتراضي) توفيراً للوقت، الجهد والتكلفة من أجل دراسة نماذج العربات.

5- قوة مقاومة الهواء والعوامل المؤثرة عليها:

تؤثر قوة مقاومة الهواء (الكبح الأيروديناميكي) عند تحرك العربة وفق المحور الطولي لها، وتتشكل هذه القوة نتيجة:

- حركة العربة في وسط هوائي ساكن (أي بدون وجود ريح).
- حركة العربة في تيار هوائي متحرك (أي بوجود ريح).
- انسياب تيار جريان هوائي على عربة غير متحركة (العربة متوقفة ولكن هناك تيارات ريحية عليها).

وبالتالي تظهر هذه القوة نتيجة وجود الهواء الذي يقاوم حركة العربة، وتختلف القوى الأيروديناميكية التي تؤثر في كل نقطة من سطح العربة بالقيمة والاتجاه، ويمكن استبدال جملة هذه القوى البسيطة بالقوة P_w، والتي تعطى بالعلاقة (1).

$$P_w = \frac{k_w.F.v^2}{(3.6)^2} \qquad (1)$$

حيث:

$-k_w$ عامل مقاومة الهواء للعربة ويقدر بـ$[\mathrm{kg}/m^3]$.

$v-$ سرعة العربة وتقدر بـ$[km/h]$.

$F-$ مساحة سطح المواجهة مع الجريان الهوائي (المساحة الجبهية)، أي المساحة المسقطة على المستوي المتعامد مع محورها الطولي وواحدتها $[m^2]$. تعطى المساحة F لكل من العربات الثقيلة (الكبيرة الأبعاد) والعربات الخفيفة (الصغيرة الأبعاد) على الترتيب بالعلاقتين التاليتين:

للعربات الثقيلة:

$$F = B.H \qquad (2)$$

للعربات الخفيفة:

$$F = 0.78\,.B.H \qquad (3)$$

حيث:

$B-$ البعد بين محاور العجلات (عرض العربة) ويقدر بـ$[m]$.

$H-$ ارتفاع العربة ويقدر بـ$[m]$.

يعطى عامل مقاومة الهواء للعربة k_w بالعلاقة التالية:

$$k_w = 0.5.\rho.c_w \qquad (4)$$

حيث:

$\rho-$ الكتلة النوعية للهواء وتقدر بـ$[\mathrm{kg}/m^3]$.

c_w- معامل الانسيابية (معامل الكبح الأيروديناميكي)، ويتعلق بكل من رقم ماخ (M) ورقم رينولدز (R_e).

بناءً على الدراسات التي أجريت على العربات تبين بأنه قوة مقاومة الهواء تكون صغيرة، حيث تكون سرعة العربة واقعة ضمن المجال $(0 \div 40)\ km/h$ وبالتالي يمكن إهمال تلك القوة، ولكن إذا تجاوزت العربة السرعة $(90\ km/h)$ فإن قوة مقاومة الهواء تصبح أكبر قوة عائقة لحركة العربة. إن قوة مقاومة الهواء على العربة كقوة كلية معيقة للحركة تنتج من المركبات التالية لها مع نسبة مساهمتها:

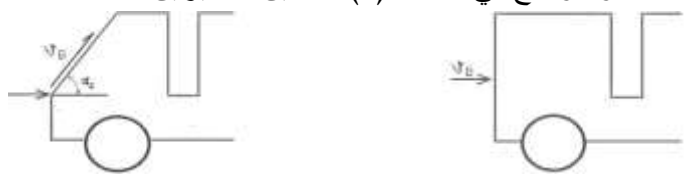
1 – مقاومة الشكل $P_w\%(60 \div 50)$: وتتعلق بالفرق بين الضغط الجبهي المرتفع أمام العربة، والضغط المنخفض الذي تسببه الدوامات خلفها.

2 – المقاومة الداخلية $(5 \div 10)\%P_w$: المتشكلة عن تيارات الهواء العابرة داخل العربة من أجل التهوية وكذلك تبريد المحرك.

3 – مقاومة الاحتكاك السطحي $(5 \div 10)\%P_w$: التي تسببها قوى لزوجة الهواء المتحرك بجوار سطوح العربة (الطبقة الحدية) والمتعلقة بخشونة السطح.

4 – قيمة مضافة مقدارها $(5\%P_w)$: تأخذ بعين الاعتبار وجود أجزاء و نتوءات بارزة في العربة (مثل: المصابيح الأمامية، المرايا الجانبية، الهوائي، ..... الخ).

بما أن مقاومة الشكل تشكل غالبية قوة مقاومة الهواء التي تتعرض لها العربة لذا فإن لشكل العربة وانسيابيتها أهميةً كبيرة في تشكيل قوة مقاومة الهواء. إن تأمين انسيابية جيدة للهواء على العربة يتعلق بزوايا ميل الواجهة الأمامية للعربة، أي يتعلق بالزاوية α_c كما هو موضح في الشكل (1) لحالتين متمايزتين.



– ب – – أ –

الشكل (1) زوايا ميلان الواجهة الأمامية للعربة

في الحالة (أ) في الشكل (1) يتم حساب قيمة الضغط الديناميكي المؤثر على الواجهة الأمامية بالعلاقة التالية:

$$q_1 = \frac{1}{2}.\rho.{v_B}^2 \qquad (5)$$

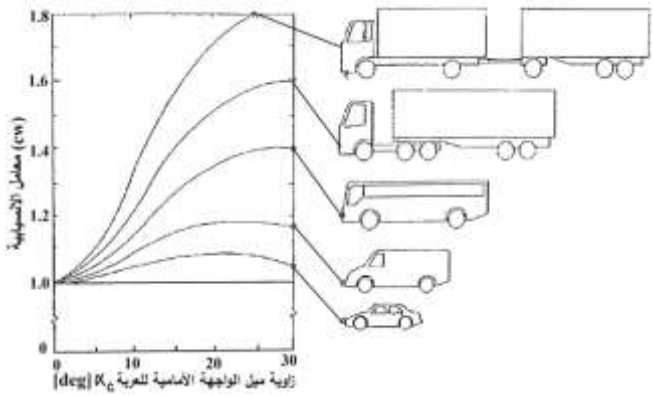
أما في الحالة (ب) فتكون قيمة الضغط وفق العلاقة:

$$q_2 = \frac{1}{2}.\rho.{v_B}^2 sin^2(\alpha_c) \qquad (6)$$

حيث: $v_B sin(\alpha_c)$ – مركبة سرعة التيار العمودي على السطح الأمامي.

بما أن $sin^2(\alpha_c) < 1$ فهذا يؤدي إلى أن $q_2 < q_1$ ، وبما أن القوة P_w تتناسب طردياً مع q فإن ميل الزجاج الأمامي بزاوية α_c يؤدي إلى تخفيض قوة مقاومة الهواء وبالتالي تنخفض القوى المعيقة لحركة العربة.

إن أشكال العربات مختلفة عن بعضها البعض وبالتالي فإن معامل الانسيابية يختلف باختلاف تصميم شكل العربة كما في الشكل (2)، حيث يلاحظ أنه باختلاف أشكال العربات يختلف معامل الكبح (معامل الانسيابية)، يعتبر c_w مؤشراً يمكن استخدامه للمقارنة بين جودة تصميم العربات من حيث "شكلها الانسيابي"، فكلما كان شكل العربة أكثر انسيابيةً كلما كان معامل الانسيابية c_w أصغر قيمةً، وكلما كانت قوة مقاومة الهواء أقل.



الشكل (2) معامل الانسيابية كتابع لزاوية الانحراف لأشكال متعددة للعربة

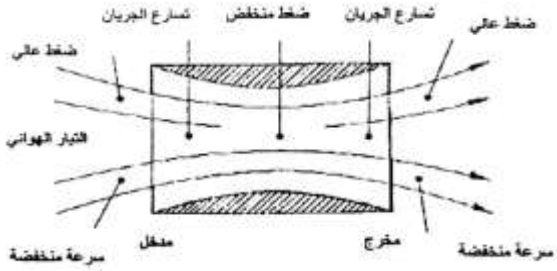
6- الطرق والآليات المستخدمة للتخفيف من مقاومة الهواء على العربات:

تتعرض العربة أثناء حركتها لقوة مقاومة الهواء التي تتشكل نتيجة لمجموع قوتين هما: قوة الاحتكاك وقوة ضغط الهواء على سطوح العربة. إن قوة الاحتكاك تتشكل نتيجة لاحتكاك جزيئات الهواء على سطوح العربة ويمكن التخفيف منها بالتقليل من خشونة السطوح، أما قوة ضغط الهواء على سطوح العربة فتتشكل نتيجة لاصطدام جزيئات الهواء وتشكل الدوامات الهوائية وبالتالي تشكل مناطق انخفاض ومناطق ارتفاع بالضغط حيث ان هذا الاختلاف في الضغط يولد ضغوطاً مقاومة لحركة العربة، يمكن تخفيضها بإجراء بعض التعديلات في شكل العربة وجعلها أكثر انسيابية.

إضافةً الى قوة مقاومة الهواء التي تعيق حركة العربة باتجاه الأمام، تتعرض أيضاً العربة الى قوى رفع تكون إما قوى موجبة نحو الأعلى تعمل على رفع العربة

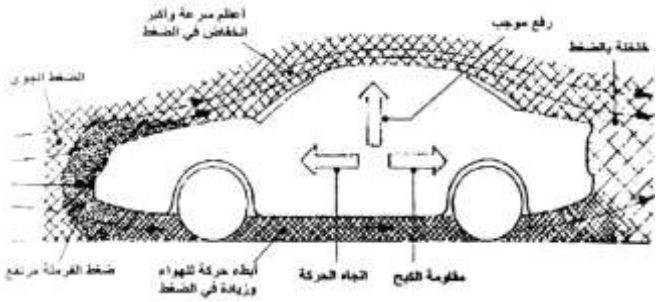
نحو الأعلى بحيث تقلل قوى تماسك العجلات مع الطريق أو قوى سالبة نحو الأسفل، وبالتالي تحسين تماسك العجلات مع الطريق.

تتشكل قوة الرفع نتيجة الفرق بين قيمتي الضغط على السطحين السفلي والعلوي للعربة، حيث أن خطوط التيار الهوائي تتحرك تحت العربة بشكل مسار خطي مباشر تقريباً، أما على السطح العلوي للعربة فتتحرك وفق مسار منحني (يتعلق بشكل العربة الانسيابي) بسرعة أعلى من جريان الهواء أسفل العربة، والذي يشبه تدفق الهواء عبر أنبوب "فينتوري" كما هو موضح في الشكل (3).



الشكل (3) أنبوب "فينتوري"

يوضح الشكل (4) جريان الهواء أسفل وأعلى العربة، ويوضح الفرق في الضغط بين أعلى وأسفل العربة وبين مقدمة ومؤخرة العربة.

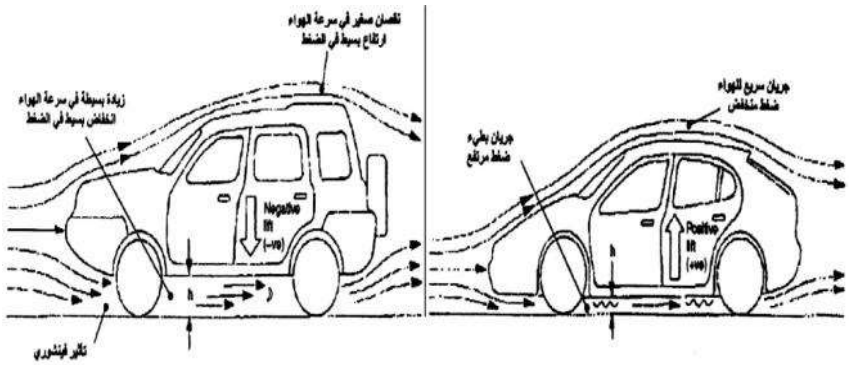


الشكل (4) قوى الرفع والكبح التي تتعرض لها العربة

تؤثر قوى الرفع على مقدمة أو مؤخرة العربة أو على كليهما معاً لذا كان من المهم إيجاد وسائل لتخفيف قوة الرفع الموجبة وتحويلها إلى قوة رفع سالبة تعمل على زيادة تماسك العربة مع الطريق وبالتالي زيادة فعالية العربة في قوى الجر وفي تحسين

القيادة والتوجيه. من الوسائل والطرق المتبعة في تحويل قوة الرفع الموجبة إلى قوة رفع سالب نحو الأسفل مايلي:

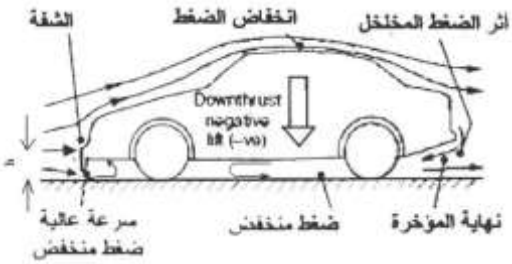
1- إجراء تعديل في مجرى المقطع تحت السطح السفلي للعربات بحيث يصبح مشابهاً نوعاً ما لأنبوب "فينتوري"، وبالتالي بزيادة سرعة الهواء أسفل العربة سينخفض الضغط إلى قيمة أقل من الضغط أعلى العربة، وتتشكل قوة رفع سالبة نحو الأسفل كما في الشكل (5).



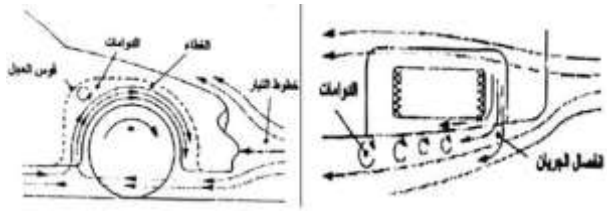
-أ- قوة رفع موجبة (للأعلى) **-ب- قوة رفع سالبة (للأسفل)**

الشكل (5) تأثير ارتفاع الأرضية على قوة الرفع

2- إضافة رفاريف سفلية (شفة) في مقدمة العربة حيث بوضعها يتم التقليل من جريان الهواء أسفل العربة وتتشكل خلفه دوامات هوائية وبالتالي تحدث هناك خلخلة وينخفض الضغط أسفل العربة، وبالتالي تتشكل قوة رفع سالبة (أي قوة نحو الأسفل) كما في الشكل (6)، كما أنه تنخفض قوة الرفع الموجبة المتشكلة عند العجلات، حيث تتولد أيضاً قوى رفع موجبة نتيجة لجريان الهواء أسفل العربة واندماجه مع الهواء الذي يكون متشكلاً في الفراغ بين إطار العجل والقوس المغطي للعجل كما في الشكل (7)، حيث يتشكل انخفاض في الضغط في مقدمة وأعلى العجل بالنسبة للمنطقة خلف وأسفل العجل، وهذا ما يسبب في تشكيل قوى رفع موجبة وأيضاً تتشكل دوامات نتيجة خروج الهواء المحاصر في التجويف حيث يطرد من مقدمة العجل الى الجانب وتتشكل الدومات.



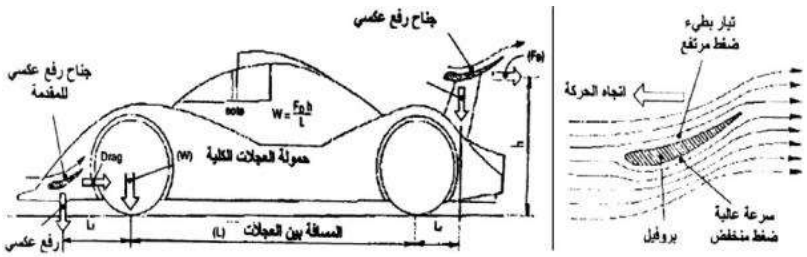
الشكل (6) تأثير الشفة في مقدمة العربة



– أ– منظر سفلي – ب– منظر جانبي

الشكل (7) جريان الهواء على عجلة مثبتة على العربة

3- تركيب أسطح انسيابية للرفع السالب وهي عبارة عن أجنحة تركب في مقدمة ومؤخرة العربة الخفيفة، تعمل على تشكيل قوة رفع سالبة وتزيد من تماسك العجلات مع الطريق كما في الشكل (8).

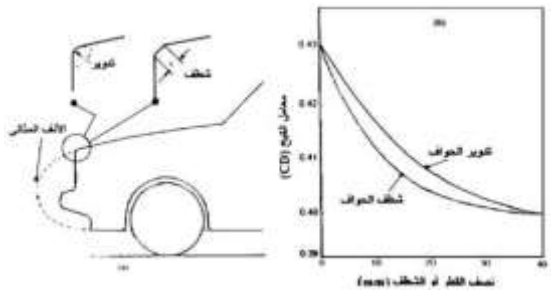


– أ– أجنحة الرفع العكسي لعربات السباق – ب– خطوط التيار لجناح بروفيل مائل

الشكل (8) تأثير تركيب أجنحة على الرفع والكبح

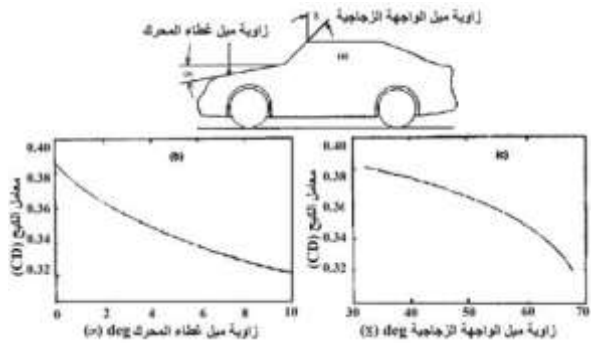
أما بالنسب لقوة ضغط الهواء (قوة الكبح) فمن الوسائل والطرق المتبعة للتخفيف من تأثيرها على العربات السياحية الخفيفة ما يلي:

1- شطف وتدوير الحواف كما في الشكل (9).



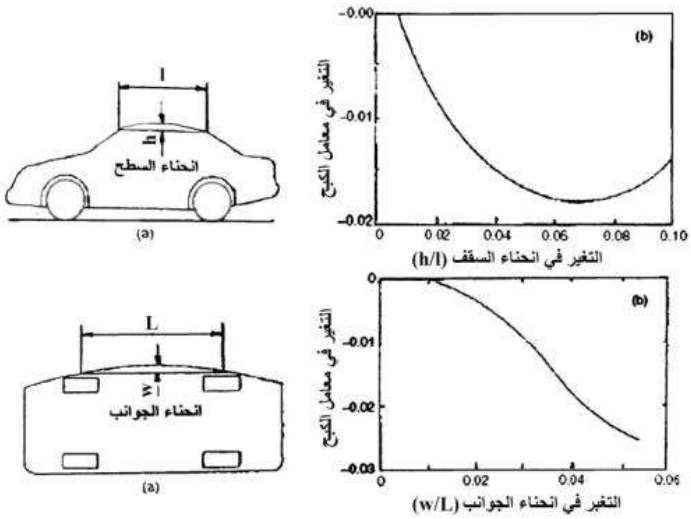
الشكل (9) تأثير تدوير وشطف الحواف

2- إمالة كل من الغطاء والنافذة الأمامية كما في الشكل (10).



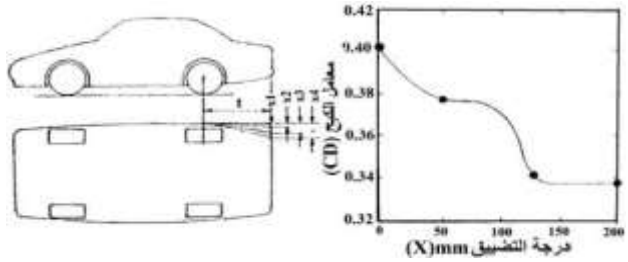
الشكل (10) تأثير إمالة الواجهة الزجاجية الأمامية وزاوية غطاء المحرك

3- تحديب كل من السقف والجوانب كما في الشكل (11).



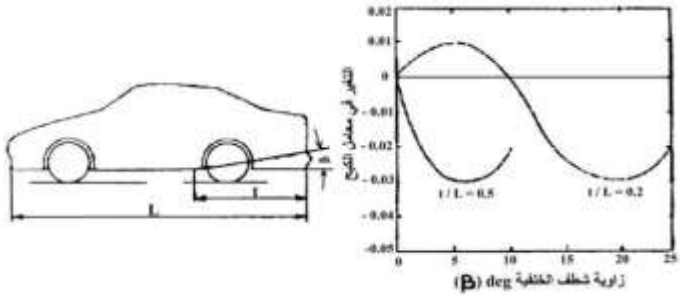
الشكل (11) تأثير تحديب السقف العلوي والجوانب

4- تضييق (تنحيف) جوانب المؤخرة كما في الشكل (12).



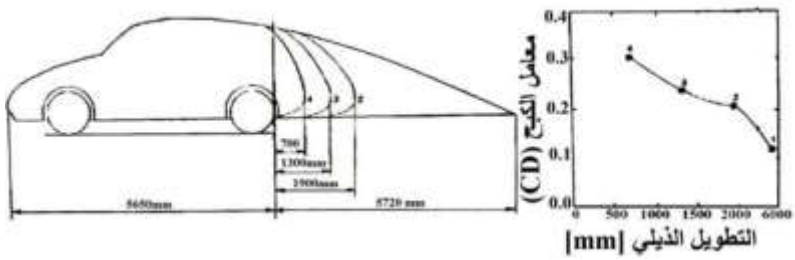
الشكل (12) تأثير التضييق في جوانب المؤخرة للعربة

5- التضييق لنهاية وأسفل مؤخرة العربة كما في الشكل (13).



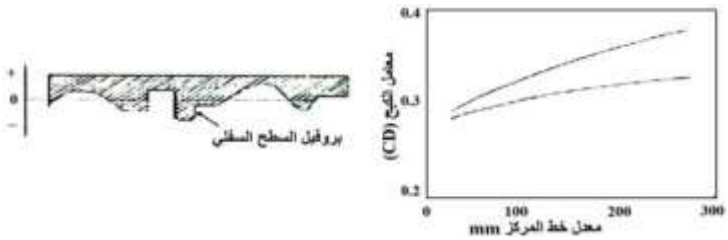
الشكل (13) إمالة أسفل المؤخرة وتأثيره على معامل الكبح

6- التطويل الذيلي لمؤخرة العربة كما في الشكل (14).



الشكل (14) تأثير التطويل الذيلي لمؤخرة العربة

7- تخشين السطح السفلي للعربة كما في الشكل (15).

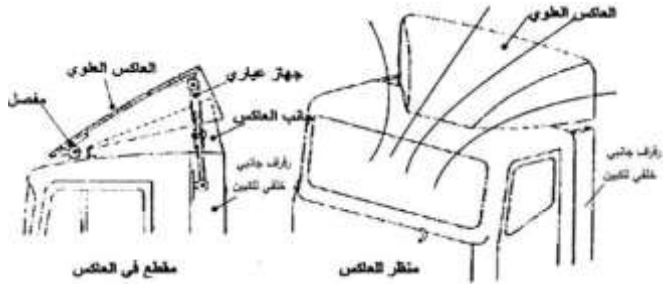


الشكل (15) تأثير خشونة أسفل العربة

أما بالنسبة للعربات الشاحنة فمن الآليات والطرق المتبعة للتخفيف من تأثير قوة مقاومة الهواء:

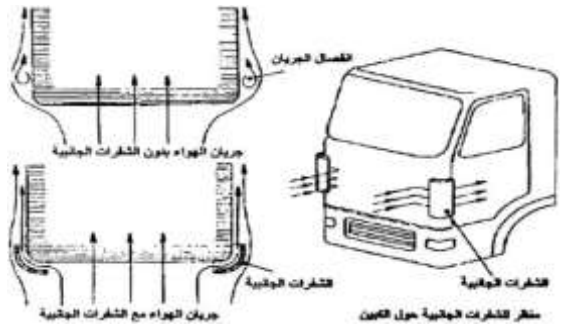
1- استخدام عاكس (مجسم انسيابي) علوي للعربة كما في الشكل (16).

2- تركيب رفاريف جانبية خلفية للكبين كما في الشكل (16).



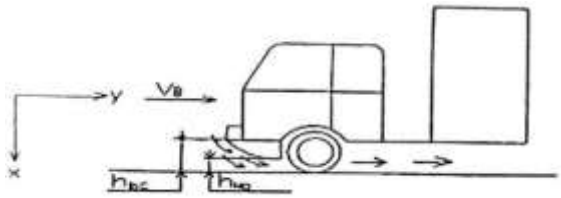
الشكل (16) عاكس السقف العلوي والرفراف الخلفي للكبين

3- تركيب شفرات أمامية جانبية كما في الشكل (17).



الشكل (17) تأثير الشفرات الزاوية في التخفيض من انفصال الجريان

4- تزويد العربة بغطاء انسيابي سفلي كما في الشكل (18).

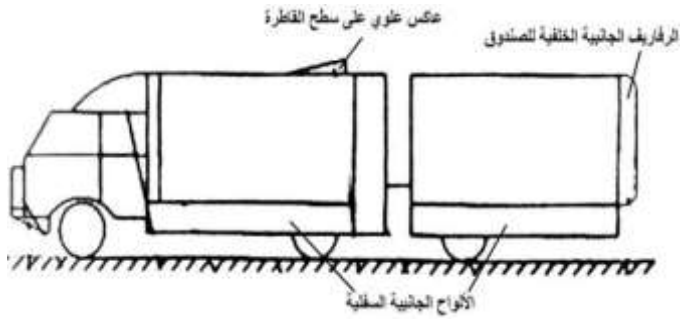


الشكل (18) توضع الغطاء الانسيابي السفلي وأبعاده

5- استخدام الألواح الجانبية السفلية كما في الشكل (19).

6- وضع عاكس (مجسم انسيابي) علوي على سطح القاطرة كما في الشكل (19).

7- استخدام رفاريف جانبية خلفية للصندوق كما في الشكل (19).



الشكل (19) الألواح و الرفاريف الجانبية والعاكس العلوي على القاطرة

7- الدراسة العملية والمخبرية:

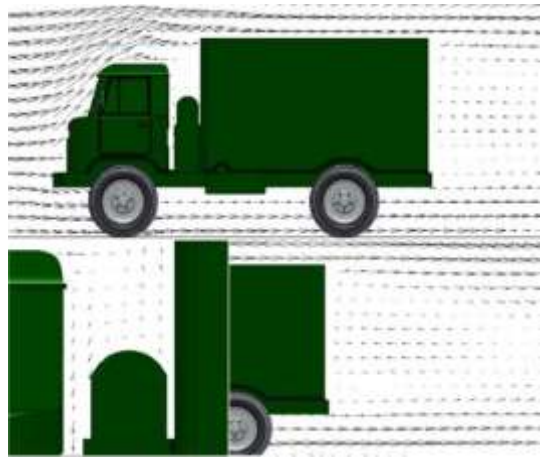
بعد معرفة الطرق والأساليب المتبعة لتخفيض مقاومة الهواء على العربات والتي تؤثر على عامل مقاومة الهواء، وبعد اتخاذ بعض الإجراءات الموجهة لتخفيف قوة مقاومة الهواء على عربة شاحنة "غاز66" كان لابد من معرفة قيمة هذا العامل الجديد بعد اجراء التغيير على الشكل الخارجي للعربة.

نتيجةً لتطور العلوم والأبحاث أصبح بالإمكان استخدام الحاسوب وإجراء عمليات محاكاة للعربات المصممة وتحديد قوة وعامل مقاومة الهواء وإجراء الاختبارات والتعديلات اللازمة افتراضياً قبل المباشرة في تصنيع العربة.

تم بناء نموذج شبيه بالعربة غاز66 عددياً ضمن بيئة SolidWorks وتم اجراء عملية محاكاة افتراضية للنموذج ضمن حزمة FlowSimulation بتعريضه لتيار هوائي بسرعات ذات قيم مختلفة ابتداءً من القيمة 50km/h وحتى القيمة 100km/h في حقل جريان هوائي افتراضي (كنفق هوائي حاسوبي) ضمن بيئة البرنامج بافتراض أن العربة تتحرك في وسط هوائي جاف وعند مستوى سطح البحر (H=0) حيث درجة الحرارة (15℃) والضغط الجوي ($1.01325\ kg/cm^2$) حيث كثافة الهواء ($\rho = 1.225\ kg/m^3$)، وتم تدوين النتائج ومقارنتها مع القيم المحسوبة نظرياً كما في الجدول (1)، وتم ايضاً بيان أماكن تشكل الدوامات الهوائية وأماكن تمركز أكبر قيم للضغوط على سطوح العربة كما في الشكلين (20) و(21).

الجدول (1) قيم قوة مقاومة الهواء البرمجية والنظرية لعربة ذات صندوق مغلق

م	v [km/h]	قوة مقاومة الهواء P_w[N]			عامل مقاومة الهواء $K_W[Kg/m^3]$	
		برمجياً	نظرياً	الخطأ النسبي %	برمجياً	نظرياً
1	50	723.796	718.738	0.699%	0.7150	0.71
2	60	1040.72	1034.983	0.551%	0.7139	0.71
3	70	1418.62	1408.727	0.697%	0.7150	0.71
4	80	1848.32	1839.970	0.452%	0.7132	0.71
5	90	2340.49	2328.713	0.503%	0.7136	0.71
6	100	2896.27	2874.954	0.736%	0.7153	0.71



الشكل (20) حقل الجريان الهوائي على العربة مع أماكن تشكل الدوامات

الشكل (21) حقل توزع الضغوط على سطوح جسم العربة

بما أن قوة مقاومة الهواء عند السرعات العالية هي أكبر قوة معيقة لحركة العربة، وبعد أن يتم تحديد قيم هذه القوة عند سرعات مختلفة، فإنه يمكن حساب قوة

الجر لهذه العربة بمعرفة كل من وزن العربة وبارامترات المحرك وأجهزة نقل الحركة للعربة، وبالتالي يتم تحديد وحساب السرعة العظمى لهذه العربة.

7-1- حساب السرعة العظمى للعربة غاز 66 قبل التعديل:

يبين الجدول (2) البارامترات الأساسية للعربة "غاز66".

الجدول (2) البارامترات الأساسية لمحرك وأجهزة نقل الحركة للعربة "غاز66"

كتلة العربة G	3470 [kg]
الاستطاعة العظمى للمحرك $N_{e_{max}}$	84.6 [kw] = 84600[W]
سرعة دوران المحرك عند الاستطاعة العظمى n_{e_N}	3300 [r. p. m] = 55 [1/sec]
نصف قطر العجل r_k	0.51 [m]
نسبة نقل مجموعة نقل الحركة الرئيسية i_o	6.82
مردود أجهزة نقل الحركة η_{TR}	0.95
الثوابت التصميمية للمحرك a,b,c	$a = 0.44 , b = 2.12 , c = 1.56$
معامل التدحرج على طريق إسفلتي f	0.02

لحساب السرعة العظمى للعربة v_{max} تم حساب عزم المحرك عند الاستطاعة العظمى له M_{e_N} بالعلاقة (7)، وحساب سرعة دوران المحرك n_e عند كل سرعة وفق العلاقة (8)، وحساب عزم المحرك M_e الموافق لكل سرعة وفق العلاقة (9)، وحساب قوة الجر المكافئة P_{e_q} عند كل سرعة وفق العلاقة (10)، وحساب قوة المقاومة المكافئة P_R عند كل سرعة لكل نموذج للعربة (قبل التعديل وبعد التعديل) وفق العلاقة (11)، وتم تدوين نتائج الحسابات في الجدول رقم (3).

$$M_{e_N} = \frac{N_{e_{max}}}{\omega_N} = \frac{N_{e_{max}} * 60}{2\pi . n_{e_N}} \qquad [N.m] \qquad (7)$$

$$n_e = \frac{v . i_{TR}}{0.377 * r_k} \qquad [r.p.m] \qquad (8)$$

$$M_e = M_{e_N}\left[a + b\left(\frac{n_e}{n_{e_N}}\right) + c\left(\frac{n_e}{n_{e_N}}\right)^2\right] \qquad [N.m] \qquad (9)$$

$$P_{e_q} = \frac{M_e . i_o . \eta_{TR}}{r_k} \quad [N] \quad (10)$$

$$P_R = P_w + P_f \quad [N] \quad (11)$$

الجدول رقم (3) بارامترات الأداء للعربة غاز66 قبل التعديل

P_R[N]	P_{e_q}[N]	M_e[N. m]	n_e[r. p. m]	M_{e_N}[N. m]	v [km/h]
1417.796	3510.729	276.350	1774	244.809	50
1734.72	3602.616	283.583	2128	244.809	60
2112.62	3591.373	282.698	2483	244.809	70
2542.32	3450.347	271.597	2838	244.809	80
3034.49	3206.622	252.412	3192	244.809	90
3590.27	2850.074	224.346	3547	244.809	100

تم رسم المنحني البياني لقيم قوى الجر المكافئة ولقوى المقاومة المكافئة للعربة عند كل سرعة، حيث أن نقطة تقاطع المنحنيين تقابل السرعة العظمى للعربة كما هو موضح في الشكل (25).

من المخطط يمكن إيجاد السرعة العظمى للعربة قبل التعديل بالاستيفاء الداخلي:

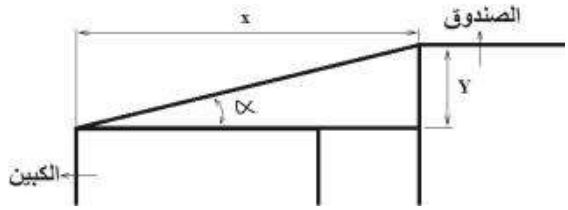
$$\frac{v_{max} - v_a}{v_b - v_a} = \frac{P_{res\,max} - P_{res\,a}}{P_{res\,b} - P_{res\,a}} \Rightarrow \frac{v_{max} - 90}{100 - 90} = \frac{0 - 172.132}{-740.196 - 172.132}$$
$$\Rightarrow v_{max} = 91.887 km/h$$

7-2- اجراء تعديل على العربة غاز66:

من أكثر الطرق المتبعة في العربات الشاحنة للتخفيف من قوة مقاومة الهواء والأثر الهوائي القيام بتركيب عواكس (متممات انسيابية) علوية على كبين العربة وإغلاق الفراغ بين الكبين والصندوق وإجراء عمليات لتحسين شكل البروفيل السفلي للعربة.

تم تصميم عدة عواكس بأبعاد ومواصفات مختلفة بواسطة البرنامج الحاسوبي solidworks حيث يوضح الشكل (22) أبعاد العاكس فوق الكبين، وتم اجراء عمليات محاكاة افتراضية ضمن حزمة FlowSimulation عند كل نموذج للعاكس وذلك عند السرعة العظمى للعربة قبل التعديل وتم تدوين النتائج في الجدول (4)، وتم رسم

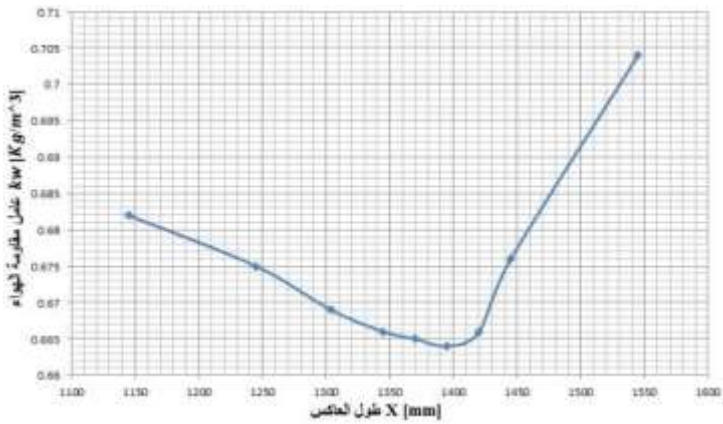
النتائج بالمخطط البياني الذي يصف العلاقة بين عامل مقاومة الهواء وطول العاكس كما هو موضح في الشكل (23).



الشكل رقم (22) توصيف أبعاد العاكس هندسياً فوق الكبين

الجدول رقم (4) قيم قوة وعامل مقومة الهواء لنماذج العاكس العلوي المختلفة وذلك عند السرعة العظمى للعربة $v_{max} = 91.887$

$k_w[Kg/m^3]$	$P_w[N]$	α[deg]	X[mm]	Y[mm]
0.704	2405.666	14.97	1544.85	360
0.676	2311.142	16.03	1445	360
0.666	2277.824	16.32	1420	360
0.664	2269.838	16.62	1395	360
0.665	2272.602	16.93	1370	360
0.666	2277.031	17.25	1345	360
0.669	2287.602	17.81	1303.78	360
0.675	2306.299	18.67	1245	360
0.682	2331.089	20.36	1145	360



الشكل رقم (23) مخطط عامل مقاومة الهواء بدلالة طول العاكس العلوي للكبين

تم اختيار شكل وأبعاد العاكس الذي نتج عنه أقل قيمة لعامل مقاومة الهواء وتم إغلاق الفراغ بين الكبين والصندوق من الجوانب وإجراء عملية تحسين لشكل

بروفيل السطح السفلي للعربة، وذلك كما في الشكل (24)، ومن ثم تم إجراء عملية محاكاة لهذا النموذج المعدل للعربة وتم تدوين النتائج بعد الحساب في الجدول (5).

الشكل رقم (24) العربة غاز66 بعد التعديل

الجدول رقم (5) قيم قوة مقاومة الهواء البرمجية والنظرية لعربة ذات صندوق مغلق بعد التعديل

م	v [km/h]	$P_w[N]$ قوة مقاومة الهواء			$K_W[Kg/m^3]$ عامل مقاومة الهواء	
		برمجياً	نظرياً	الخطأ النسبي %	برمجياً	نظرياً
1	50	630.364	627.631	|0.434| %	0.623	0.62
2	60	906.396	903.788	|0.288| %	0.623	0.62
3	70	1232.468	1230.156	|0.188| %	0.621	0.62
4	80	1611.748	1606.735	|0.311| %	0.623	0.62
5	90	2036.561	2033.524	|0.149| %	0.621	0.62
6	100	2513.517	2510.523	|0.119| %	0.621	0.62

7-2- حساب السرعة العظمى للعربة "غاز66" بعد التعديل:

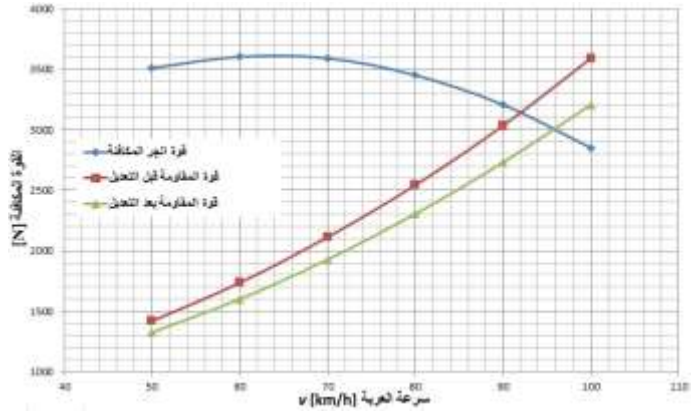
بعد إجراء التعديل على نموذج العربة فإنه من المتوقع أن تتغير قيم قوى المقاومة المكافئة، حيث تم حسابها عند كل سرعة وفق العلاقة (11)، وتم وضع النتائج في الجدول (6).

الجدول رقم (6) بارامترات الأداء للعربة "غاز66" بعد التعديل

$P_R[N]$	$P_{e_q}[N]$	$M_e[N.m]$	$n_e[r.p.m]$	$M_{e_N}[N.m]$	v [km/h]
1324.364	3510.729	276.350	1774	244.809	50
1600.396	3602.616	283.583	2128	244.809	60
1926.468	3591.373	282.698	2483	244.809	70
2305.748	3450.347	271.597	2838	244.809	80
2730.561	3206.622	252.412	3192	244.809	90

3207.517	2850.074	224.346	3547	244.809	100

تم رسم المنحني البياني لقيم قوى الجر المكافئة ولقوى المقاومة المكافئة للعربة عند كل سرعة حيث أن نقطة تقاطع المنحنيين تقابل السرعة العظمى للعربة كما هو موضح في الشكل (25).



الشكل (25) مخططات قوتي المقاومة قبل التعديل وبعد التعديل والقوة المكافئة بدلالة سرعة العربة

يتم حساب السرعة العظمى للعربة بعد إجراء التعديل بالاستيفاء الداخلي:

$$\frac{v_{max}-v_a}{v_b-v_a}=\frac{P_{res\,max}-P_{res\,a}}{P_{res\,b}-P_{res\,a}}\Rightarrow\frac{v_{max}-90}{100-90}=\frac{0-476.061}{-357.443-476.061}$$
$$\Rightarrow v_{max}=95.712km/h$$

الاستنتاجات:

في ختام الدراسة والبحث، وبعد الحصول على مختلف نتائج الدراسات والحسابات والتي تم استعراضها في الفقرات السابقة، فإنه يمكن استخلاص ما يلي:

1- إن لشكل العاكس وأبعاده تأثيراً كبيراً على عامل مقاومة الهواء، وتتعلق تلك القيمة بارتفاع الصندوق وبُعد الصندوق عن الكبين.

2- إن استخدام العاكس بالأبعاد المعرف بالطول (X=1395[mm]) والارتفاع (Y=360[mm]) والزاوية(α=16.62°) أدى إلى تخفيض عامل مقاومة الهواء بنسبة 7.04%.

3- بعد إضافة العاكس الأفضل وإغلاق الفراغ بين الكبين والصندوق وتحسين سطح البروفيل السفلي للعربة فإن عامل مقاومة الهواء انخفض بنسبة 12.7%.

4- إن الانخفاض في قيمة عامل مقاومة الهواء أدى إلى تحسين استطاعة العربة بحيث ازدادت السرعة العظمى للعربة بنسبة 4% تقريباً.

المراجع:

1- خضور سليم، 2012 – نظرية عربات. الطبعة الأولى، أكاديمية الأسد للهندسة العسكرية بحلب، سوريا، 273 صفحة.

2- LARSSON L and MARTINI H., 2009 - Aerodynamic Drag Reduction of a Heavy Truck with Variable Cooling Air Intake Are. Chalmers University OF Tecnology, 14th ed, Göteborg, Sweden, 96.

3- Chowdhury H, Moria H, Ali A & Khan I, Alam F and Watkins S., 2013 - A study on aerodynamic drag of a semi trailer truck. Procedia Engineering, 56 (2013), 201-205.

4- سرحان يعرب، 2008 - دراسة تأثير قوة مقاومة الهواء المؤثرة على العربات وتأثير عوامل الشكل والنقل على الأداء واستهلاك الطاقة. الطبعة الأولى، أكاديمية الأسد للهندسة العسكرية بحلب، سوريا، 116 صفحة.

5- HAMMAD A and XING T., 2017- Aerodynamic Effects on Two Lane Rural Highway Safety. PacTrans, United States of America.

6- BEZABH T., 2019- Aerodynamic Effect on a Vehicle Profile. Ijariie, Vol.5, 1472-1475.