

## تحديد قيمة الطول الحرج في الميول الطولية الصاعدة للطرق ذات حارتي المرور

د. م. خالد شهابي\*

### الملخص

الطول الحرج critical length للميل الطولي التصميمي، هو الطول الأعظمي من طريق له منحدر طولي صاعد محدد الذي تستطيع شاحنة نموذجية اجتيازه دون أن تنخفض سرعتها بشكل ملحوظ عن السرعة التصميمية للطريق (يؤخذ الانخفاض في السرعة عادة بمقدار 15 كم/سا)، فإذا زادت مسافة الميل الصاعد عن الطول الحرج في الطرق ذات حارتي المرور يصبح من المفضل إضافة حارة مرور مخصصة للشاحنات المتباطئة، حتى لا تعيق حركة المرور على الطريق الرئيسية، أو تؤثر في سلامة المرور. تعطي الكودات قيمة الطول الحرج بمخططات أو جداول تستند إلى قيمة محددة لدرجة الشاحنة عند دخولها إلى الجزء الصاعد من الطريق، فمثلاً يعدُّ كود AASHTO أن سرعة دخول الشاحنة 110 كم/سا. لذلك من المهم تحديد قيمة الطول الحرج بعلاقة عامة ومبسطة. وفي هذا البحث استُنْتُجَتْ علاقة تعتمد على المبادئ الأساسية لعلم الديناميك، يمكن من خلالها استنتاج العلاقة المطلوبة، كما أُجْرِيَ تقييم لهذه العلاقة وبيان حدود تطبيقها.

الكلمات المفتاحية: الطول الحرج Critical length - حارة التسلق Climbing lane - الميل الأعظمي Maximum grade - الميل الصاعد Upgrade - الشاحنة النموذجية Standard Truck.

\* مدرس في الجامعة الدولية الخاصة للعلوم والتكنولوجيا - كلية الهندسة - قسم الهندسة المدنية والبيئة.

## 1- المقدمة:

يتعلق تصميم الميول الطولية الصاعدة للطرق بعاملين أساسيين: الأول: هو الميل الطولي الأعظمي المسموح للطريق، المتعلق بالسرعة التصميمية للطريق وبصنف الطريق، وبطبيعة الأرض الطبغرافية.

الثاني: الطول الحرج critical length للميل الطولي التصميمي، وهو الطول الأعظمي من طريق له منحدر طولي صاعد محدد الذي تستطيع شاحنة نموذجية اجتيازه دون أن تتخفض سرعتها انخفاضاً ملحوظاً عن السرعة التصميمية للطريق. [3] إذا زاد طول الجزء الصاعد من الطريق على الطول الحرج لهذا الميل، فإن السيارات السياحية التي تدخل هذا الميل بالسرعة التصميمية للطريق تستطيع المحافظة على هذه السرعة دون انخفاض ملحوظ في سرعتها، أما الشاحنات الثقيلة التي تدخل هذا الميل بالسرعة التصميمية للطريق فستتناقص سرعتها بشكل ملحوظ؛ ممّا قد يتسبب بعرقلة السيارات خلف هذه الشاحنات وخاصة في الطرق ذات حارتي المرور، مما قد يؤدي إلى حدوث حوادث سير، وتخفيض مستوى الخدمة لهذا المقطع من الطريق [1]. وتكون هذه المشكلة مهمة وبحاجة إلى معالجة في الطرق ذات حارتي المرور كما ذكر سابقاً وفي الميول الطولية الصاعدة الحادة، والسرعة التصميمية العالية للطرق، وعند وجود غزارة مرور كثيفة.

لتلافي هذا الخلل في التصميم، وبهدف التقليل من احتمال حوادث السير يلجأ المصممون (في حال اضطرارهم إلى تصميم ميل طولي صاعد يتجاوز طوله قيمة الطول الحرج) إلى تنفيذ حارة مرور إضافية خاصة بالشاحنات تسمى حارة التسلق climbing lane. تكون بداية حارة التسلق هذه على مسافة s من بداية الميل الصاعد، هذه المسافة s هي ما سُمّي بالطول الحرج. تعرّف الكودات هذه المسافة بأنها المسافة التي تتخفض خلالها سرعة الشاحنة التي تسير على الميل الصاعد بمقدار يجعل الشاحنة تعيق حركة السيارات السياحية وتؤثر

في سلامة المرور. وقدّرت الدراسات أن مقدار انخفاض السرعة المؤثر في سلامة المرور هو 15 كم/سا عن السرعة التصميمية للطريق [1] و[2] و[3] و[4]، وتُعدّ السرعة التصميمية للطريق هي نفسها سرعة دخول الشاحنة (entering speed) إلى الميل الصاعد للطريق. ومن ثمّ وبدءاً من المسافة s من بداية الميل الصاعد تُنقذ حارة مرور إضافية (المسماة حارة التسلق) تسير عليها الشاحنات المتباطئة بسرّعة منخفضة إلى حين انتهاء الميل الطولي الصاعد حتى لا تعيق حركة السيارات السياحية التي تسير بالسرعة التصميمية، وفي هذا البحث سُمّي الطول الحرج بالحرف s ووحدته المتر. وهو نفسه مسافة بداية حارة التسلق مقيسة ابتداءً من بداية الميل الطولي الصاعد.

## 2- الهدف من البحث:

أعطت الكودات العالمية لتصميم الطرق وسائل مبسطة تعتمد على جداول، أو مخططات بيانية لإيجاد الطول الحرج للميل الطولي الصاعد، إلا أن استخدام هذه الجداول والمخططات يبقى محدوداً؛ لأنّ تلك الجداول والمخططات وُضعت استناداً إلى فرضيات محددة. وإذا لم تتحقق تلك الفرضيات فإن النتائج ستكون غير دقيقة. لذلك هُتَفَ هذا البحث إلى استنتاج علاقة رياضية مبسطة وعملية تُحسب من خلالها قيمة الطول الحرج s مع الأخذ بالحسبان مزيداً من الحالات غير الحالات المفترضة في الكودات، بحيث يكون مجال استخدامها أوسع وأكثر سهولة ومستنداً إلى علاقات رياضية، وليس إلى جداول أو مخططات بيانية.

## 3- استعراض مرجعي عن إيجاد الطول الحرج للميل الطولي الصاعد:

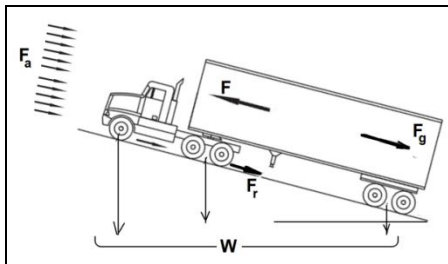
أعطت الكودات مخططات يمكن من خلالها استنتاج الطول الحرج لميل طولي صاعد قدره %G؛ وذلك من خلال دراسات أُجريت على الشاحنات الثقيلة السائدة التي لها تأثير ملحوظ في مستوى الخدمة، وفي سلامة الحركة والمرور على هذا الطريق. وقد عُدّت الشاحنة النموذجية المؤثرة هي شاحنة ثقيلة نسبة

الطولي الصاعد لحالات أكثر تعميماً من الحالات المفترضة في الكود.

4- الدراسة الديناميكية للشاحنة الثقيلة النموذجية على ميل صاعد، واستنتاج العلاقات المطلوبة:

تتبع حركة شاحنة على طريق صاعد بشكل عام حركة القوانين العامة في الديناميك؛ لأنها ليست حركة منتظمة (التسارع لا يساوي الصفر) وليست أيضاً حركة متباطئة بانتظام (التسارع ليس ثابتاً)؛ وذلك لأن التسارع يتغير مع الزمن، لذلك سُنِّتَتْجُ علاقات إيجاد الطول الحرج (بداية حارة التسلق) بإجراء الدراسة الديناميكية لحركة الشاحنة على ميل صاعد.

إن القوى المؤثرة في شاحنة في أثناء سيرها في طريق صاعد، هي قوة جر محرك الشاحنة  $F$  Tractive Force، والقوى المقاومة للحركة Resistance forces المؤلفة من: قوة مقاومة الهواء، وتأثير السحب الهوائي Air Resistance  $F_a$ ، وقوة مقاومة الدرجة Rolling Resistance  $F_r$ ، وقوة مركبة وزن الشاحنة، وتسمى مقاومة الميل Grade Resistance  $F_g$ . الشكل رقم 2. [1] و [2] و [3] و [4] و [6].



الشكل رقم 2 القوى المؤثرة في شاحنة تسير على ميل صاعد

- قوة جر الشاحنة:  $F$  تعطى بدلالة استطاعة الشاحنة، إذ يعبر عن الاستطاعة بالحصان البخاري وفق العلاقة:

$$P \text{ (horse power)} = \frac{F \cdot V}{76} \rightarrow$$

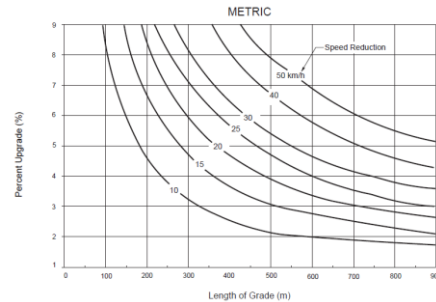
$$F = \frac{76 \cdot P}{V} \dots \dots (1)$$

إذ:  $F$  - قوة جر محرك الشاحنة Kg.f

وزنها إلى استطاعتها مساو إلى 120 كغ. ث/ كيلواط ( $W/P=120 \text{ Kg.f/KW}$ ) وكذلك نسبة وزنها إلى مساحة واجهتها 1000 كغ. ث/م<sup>2</sup> ( $W/A=1000 \text{ Kg.f/m}^2$ ) [1] و [6]. وقد ورد في كود AASHTO [1] مخططات يمكن من خلالها استنتاج الطول الحرج لميل طولي صاعد بدلالة السرعة التي يسمح بانخفاضها عن السرعة التصميمية للطريق (بانخفاض السرعة بمقدار 10 كم/سا، أو 15 كم/سا أو 25 أو 30...).

الشكل رقم 1. وقد اعتمدت هذه المخططات على الفرضيات الآتية:

- 1- الشاحنة النموذجية التي وُضِعَتِ المخططات على أساسها هي الشاحنة النموذجية المذكورة أعلاه.
- 2- الشاحنة تدخل إلى الجزء الصاعد من الطريق بسرعة 110 كم/سا. أما في حالة الدخول إلى الجزء الصاعد بسرعة مختلفة فتُعدَّلُ القيم الناتجة عن استخدام الشكل رقم 1.



الشكل رقم 1 الأطوال الحرجة لميول صاعدة؛ وذلك لشاحنة

نموذجية، وبافتراض أن سرعة الدخول إلى الميل 110 كم/سا؛ وفق

ما ورد في كود AASHTO [1].

إن استخدام المخططات يبقى محدوداً بسبب صعوبة استخدامها عندما تكون السرعة التصميمية للطريق ليست 110 كم/سا، (وهي السرعة التي ستدخل فيها الشاحنة إلى الميل الصاعد)؛ ممّا يجعل من مسألة تحديد قيمة الطول الحرج (نقطة بداية حارة التسلق) مسألة معقدة نسبياً، ومن هنا تأتي أهمية هذا البحث الذي هدَفَ إلى إيجاد طريقة مبسطة وعملية لتحديد قيمة الطول الحرج على الميل

$$\sum F = m \cdot a \rightarrow F - (\text{resistance forces}) = m \cdot a \quad \dots \dots \dots (5)$$

بتعويض كل قوة من القوى بقيمتها من العلاقات الواردة

$$m = \frac{W}{g} \quad \text{نجد:}$$

$$\frac{76.P}{v} - 0.5 \frac{1.227.C_D.A}{9} . 81 v^2 - 0.001(6.6 + 0.103v)W - G.W = \frac{W.a}{9} . 81 \quad \dots \dots (6)$$

ومنها تُستنتج قيمة التسارع a عند سرعة محددة، (وهي قيمة متغيرة):

$$a = (9.81.76.P)/(W.v) - (0.5.1.227.C_D.A).v^2/W - 0.001.9.81(6.6+0.103.v) - 9.81G \quad \dots (7)$$

نرمز إلى نسبة وزن الشاحنة إلى استطاعتها بالرمز ρ

$$\rho = \frac{W}{P} \quad \text{أي:}$$

ونرمز إلى نسبة وزن الشاحنة إلى مساحتها واجهتها بـ A'

$$A' = \frac{W}{A} \quad \text{أي:}$$

فتصبح العلاقة التي تعطي قيمة التسارع عند سرعة محددة:

$$a = 745 \cdot \frac{56}{\rho.v} - 0. \frac{4}{A'} v^2 - 0.065 - 0.001.v - 9.81.G \quad \dots (8)$$

وبأخذ قيمتي A'=1000 kg.f/m<sup>2</sup> و ρ=50 kg.f/hpp للشاحنة النموذجية تصبح العلاقة:

$$a = 745 \cdot \frac{56}{50.v} - 0. \frac{4}{1000} v^2 - 0.065 - 0.001.v - 9.81.G \quad \dots (9)$$

أي:

$$a = 14 \cdot \frac{911}{v} - 0.0004v^2 - 0.065 - 0.001.v - 9.81.G \quad \dots (10)$$

وهي علاقة عامة يمكن من خلالها حساب قيمة التسارع لشاحنة نموذجية بدلالة السرعة (المتغيرة في كل لحظة بدلالة الزمن)، وبدلالة الميل الطولي للمنحدر الصاعد. ونظراً إلى أن المطلوب هو حساب الطول الحرج (أي المسافة s اللازمة لتتناقص سرعة الشاحنة من السرعة

-P استطاعة المحرك بالحصان البخاري hp

-V السرعة بالمتري/ثانية m/sec

- قوة مقاومة الهواء: F<sub>a</sub> كغ.ث. وهي القوة الناتجة عن مقاومة الهواء للحركة وعن الخلطة الهوائية (السحب أو التفريغ الهوائي) حول الشاحنة، تعطى بالعلاقة:

$$F_a = 0.5 \frac{\psi.C_D.A}{g} . V^2 \quad \dots (2)$$

إذ:

ψ- كثافة الهواء، وتساوي عند سطح البحر 1.227kg-f/m<sup>3</sup>

-C<sub>D</sub> معامل السحب الهوائي (الخلطة الهوائية)

aerodynamic drag coefficient ويعطى للشاحنات الثقيلة

بالقيمة التقريبية 0.65 [3]

-A مساحة واجهة الشاحنة بالمتري المربع المعرضة

لمقاومة الهواء.

-V السرعة بالمتري/ثانية m/sec

- قوة مقاومة الدرجة: F<sub>r</sub> كغ.ث. وهي القوة الناتجة عن

وجود مساحة تماس لدولاب الشاحنة مع الطريق، ينتج

عنها قوة مقاومة للحركة. هناك عدة علاقات تجريبية

لحساب هذه القوة منها العلاقة الآتية التي تعد أكثر

مطابقة للشاحنة النموذجية: [6]

$$F_r = 0.006(6.6 + 0.103V).W \quad (3)$$

إذ:

-W وزن الشاحنة kg-f

-V السرعة بالمتري/ثانية m/sec

- قوة مقاومة الميل: F<sub>g</sub> كغ. ث. تعطى بالعلاقة:

$$F_g = G.W \quad \dots \dots \dots (4)$$

إذ:

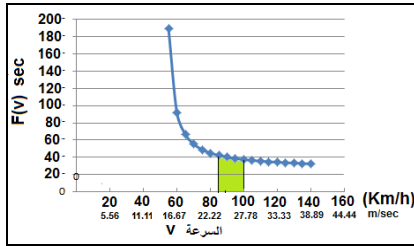
-W وزن الشاحنة kg-f

-G الميل الصاعد لمقطع الطريق.

بحسب القانون الثاني لنيوتن (القانون الأساسي للحركة) [5]:

مجموع القوى المؤثرة في الشاحنة = الكتلة × التسارع أي:

قوة جر الشاحنة- القوى المقاومة للحركة = الكتلة × التسارع



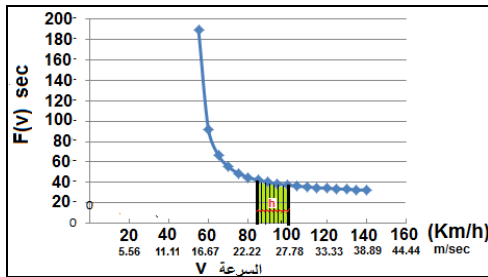
الشكل رقم 3 مخطط العلاقة بين السرعة  $v$  والتابع  $F(v)$  لميل صاعد 9% فإذا كانت السرعة التصميمية لطريق 100 كم/سا، ودخلت شاحنة نموذجية تسير على هذا الطريق بالسرعة التصميمية إلى ميل صاعد قدره 9%، فإن سرعة الشاحنة ستتناقص بمقدار 15 كم/سا خلال مسافة قدرها

$$s = \int_{27}^{100} 0.78^{23} \cdot 61F(v) \cdot dv \dots\dots\dots (16)$$

وهذا التكامل يساوي المساحة المظللة تحت المنحنى في الشكل 3، إذ يمكن حساب التكامل (أو المساحة) بالطرائق العددية كطريقة متوازيات الأضلاع (الشكل 4)، أي بالعلاقة:

$$s = \sum_{i=1}^{n-1} 0.5(F_{i+1}(v) - F_i(v)) \cdot h \dots\dots\dots (17)$$

كلما قلت المسافة  $h$  ازادت دقة الحسابات. أُجريت الحسابات اللاحقة بحساب التكامل وفق الطريقة المذكورة بأخذ  $h=1 \text{ Km/h}=0.278 \text{ m/sec}$



الشكل رقم 4: طريقة متوازيات الأضلاع لحساب التكامل

5- إيجاد علاقة مبسطة لحساب الطول الحرج لميل صاعد قدره 9%:

حُسِبَ باستخدام برنامج Excel واستناداً إلى علاقة التكامل السابقة الطول الحرج (المسافات المطلوبة من بداية الميل الصاعد حتى بداية حارة التسلق) بحسب سرعة الدخول إلى

التصميمية إلى سرعة أقل منها بـ 15 كم/سا، (وهو التناقص الذي يؤدي إلى انخفاض مستوى الخدمة، ومستوى الأمان على الطريق ذي حارتي المرور)، يجري إيجاد علاقة تلك المسافة كما يأتي:

$$a = \frac{dv}{dt}, \quad v = \frac{ds}{dt} \rightarrow$$

$$a \cdot ds = v \cdot dv \rightarrow$$

$$ds = \frac{v}{a} dv \dots\dots (11)$$

بأخذ تكامل الطرفين:

$$\int ds = \int \frac{v}{a} dv \dots\dots\dots (12)$$

$$\left[ \frac{v}{\left(14 \cdot \frac{911}{v} - 0.0004v^2\right)} \right] - 0.065 - 0.001v - 9.81 \cdot G \cdot dv \dots\dots (13)$$

$$s = \int_{v_1}^{v_2} F(v) \cdot dv \dots\dots\dots (14)$$

إذ:

$$\frac{14 \cdot \frac{911}{v} - 0.0004v^2}{-0.065 - 0.001v - 9.81 \cdot G} \dots\dots (15)$$

مع ملاحظة أنه في العلاقات السابقة:

$s$  - الطول الحرج، أي مسافة بداية حارة التسلق بالمتري (مقاسة من بداية الميل الصاعد).

$v$  - السرعة م/ثا

$a$  - التسارع م/ثا<sup>2</sup>.

$G$  - الميل الطولي الصاعد.

تُستخدَم هذه العلاقة عندما تكون حركة الشاحنة متباطئة فقط، أي عندما تكون قيمة التسارع سالبة، أو قيمة التابع  $F(v)$  سالبة.

ويرسم العلاقة بين السرعة  $v$  بالكم/سا والتابع  $F(v)$  من أجل ميل محدد  $G=9\%$  مثلاً، يظهر الشكل المبين في الشكل رقم 3: (مع الانتباه إلى أن واحدة السرعة في العلاقات السابقة هي م/ثا):

استُخدمت الطريقة الرياضية المسماة التحليل الانحداري (أو التراجعي) Regression Analysis Technique باستخدام طريقة المجموع الأصغر لمربعات الأخطاء للحصول على العلاقة المطلوبة، إذ استُعينَ ببرنامجي Excel و Matlab لإيجاد شكل العلاقة الرياضية، وقد تبين أن أقرب شكل للعلاقة التي تعبر عن الخط البياني الموضح في الشكل رقم 5 هو:

$$s = A \cdot e^{B \cdot v} \dots \dots \dots (18)$$

إذ:

A و B ثابتان سيجري إيجادهما باستخدام طريقة التحليل التراجعي Regression. -s الطول الحرج (مسافة بداية حارة التسلق ابتداءً من بداية الميل الصاعد) بالمتر.

-v سرعة الدخول إلى الميل الصاعد 9% بالكم/سا (حوّلت السرعة إلى كم/سا لأن استخدامها هو الشائع). وباستخدام طريقة التحليل التراجعي تبين أن:

$$A=263.51 \text{ و } B=-0.005 \text{ أي إنَّ العلاقة 18 تصبح:}$$

$$s = 263.51 \cdot e^{-0.005v} \dots \dots \dots (19)$$

وذلك من أجل ميل صاعد 9%.

بتكرار الخطوات والحسابات السابقة من أجل ميول صاعدة حادة أخرى (من 5% إلى 8%)، استُنْتِجَتْ علاقة خاصة بكل ميل. وأيضاً باستخدام طريقة التحليل التراجعي Regression لاستنتاج علاقة تربط الطول الحرج s بالسرعة v وبالميل الطولي الصاعد G تم الحصول على العلاقة النهائية الآتية:

$$s = 0.0183 \cdot G^{-3.94} \cdot e^{(0.02351 \ln(G) + 0.052) \cdot v} \dots \dots (20)$$

إذ:

-s الطول الحرج بالمتر.

-G الميل الطولي الصاعد.

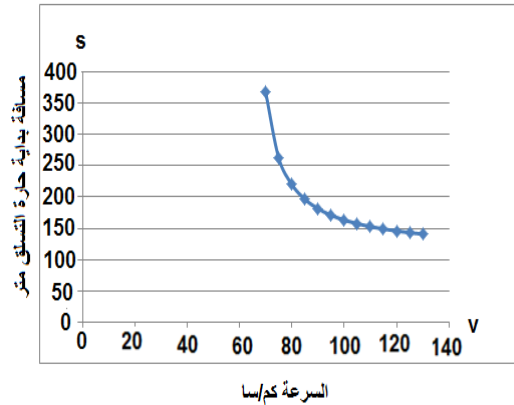
-v سرعة الدخول إلى المنحدر (وهي السرعة التصميمية) كم/سا.

الميل الصاعد وبحسب الميل الطولي الصاعد، فمثلاً من أجل ميل صاعد قدره 9% كانت النتائج بحسب الجدول رقم 1.

الجدول رقم 1 قيم الطول الحرج باستخدام العلاقة 14

سرعة الدخول م/ثا	سرعة الدخول كم/سا	الطول الحرج بالمتر (مسافة بداية حارة التسلق)
130	36.11	140.9
125	34.72	143.3
120	33.33	146
115	31.94	149.2
110	30.56	153
105	29.17	157.6
100	27.78	163.5
95	26.39	171.2
90	25	181.7
85	23.61	196.8
80	22.22	220.7
75	20.83	263.5
70	19.44	368.8
65	18.06	لا حاجة لحارة تسلق
60	16.67	لا حاجة لحارة تسلق
55	15.28	لا حاجة لحارة تسلق
50	13.89	لا حاجة لحارة تسلق

ورُسمت العلاقة بين سرعة الدخول والطول الحرج (مسافة بداية حارة التسلق) لميل صاعد قدره 9% في الشكل رقم 5، بعد تحويل السرعة إلى كم/ساعة.



الشكل رقم 5 العلاقة بين السرعة والمسافة من بداية الميل الصاعد 9% حتى بداية حارة التسلق (أي بين السرعة والطول الحرج)

وحتى يمكن التعبير عن هذه العلاقة بعلاقة رياضية مبسطة وعملية بدلاً من علاقة التكامل المعقدة نسبياً،

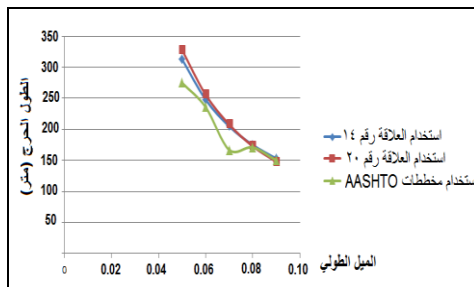
تابع الجدول رقم 2:

الميل	سرعة الدخول كم/سا	الطول الحرج s بالمتر بالعلاقة 14	الطول الحرج s بالمتر بالعلاقة 20	نسبة الخطأ %
0.08	125	160	155	3.13
0.08	120	164	161	1.83
0.08	115	169	167	1.18
0.08	110	175	173	1.14
0.08	105	183	180	1.64
0.08	100	193	186	3.63
0.07	130	175	169	3.43
0.07	125	181	178	1.66
0.07	120	187	187	0
0.07	115	195	197	-1
0.07	110	205	208	-1.5
0.07	105	218	219	-0.5
0.07	100	234	230	1.71
0.06	130	199	193	3.02
0.06	125	208	207	0.48
0.06	120	218	223	-2.3
0.06	115	231	239	-3.5
0.06	110	248	256	-3.2
0.06	105	269	275	-2.2
0.06	100	300	295	1.67

الجدول رقم 3 مقارنة نتائج استخدام العلاقة التقريبية بنتائج

## استخدام المخططات الواردة في كود AASHTO

الميل	الطول الحرج s بالمتر باستخدام العلاقة الدقيقة 14	الطول الحرج s بالمتر باستخدام العلاقة التقريبية 20	الطول الحرج s بالمتر باستخدام مخططات الكود AASHTO
G			
0.09	153	148	150
0.08	175	173	171
0.07	205	208	167
0.06	248	256	236
0.05	313	328	275



الشكل رقم 6 مقارنة نتائج استخدام العلاقة التقريبية بنتائج

## استخدام المخططات الواردة في كود AASHTO بيانياً

إذ يمكن استخدام هذه العلاقة مباشرة لتحديد قيمة s، مع ملاحظة أن استنتاج هذه العلاقة تم من أجل الميول الطولية الحادة (من 5% إلى 9%)، والسرع التصميمية العالية (من 100 كم/سا إلى 130 كم/سا)، وهي الحالات التي يحتمل أن تتسبب فيها الشاحنات بالعرقلة والتأثير في سلامة المرور.

## 6- تقييم العلاقة المستنتجة:

لتقييم دقة تطبيق هذه العلاقة قُورِنَتْ بنتائج استخدام علاقة التكامل الدقيقة (العلاقة 14) وقد أُدرِجَتْ نتائج المقارنة في الجدول رقم 2، إذ يتضح من هذا الجدول أن نسبة الخطأ لا تتجاوز 6%، وهي نسبة مقبولة في مثل هذه الدراسات والتطبيقات العملية.

ويهدف المقارنة أيضاً في الجدول رقم 3 وفي الشكل رقم 6 قُورِنَتْ نتائج استخدام العلاقة التقريبية بنتائج استخدام المخططات الواردة في كود AASHTO (حيث سرعة الدخول إلى الميل الصاعد 110 كم/سا)، وتبيّن النتائج أن استخدام العلاقة التقريبية يعطي نتائج أقرب إلى الطريقة الدقيقة من استخدام مخططات كود AASHTO.

الجدول رقم 2 مقارنة تبين نسبة الخطأ بين استخدام العلاقة

## التقريبية والعلاقة الدقيقة

الميل	سرعة الدخول كم/سا	الطول الحرج s بالمتر باستخدام العلاقة الدقيقة 14	الطول الحرج s بالمتر باستخدام العلاقة التقريبية 20	نسبة الخطأ %
G	v			
0.09	130	141	135	4.26
0.09	125	143	138	3.5
0.09	120	146	141	3.42
0.09	115	149	144	3.36
0.09	110	153	148	3.27
0.09	105	158	151	4.43
0.09	100	164	154	6.1

#### 7- النتائج والتوصيات:

- تعطي العلاقة المستنتجة رقم 20 نتائج مقبولة عملياً لإيجاد الطول الحرج (المسافة بين بداية حارة التسلق، وبداية الميل الصاعد)؛ وذلك من أجل ميول صاعدة من 5% إلى 9%، ومن أجل طرق بحارتي مرور لها سرعة تصميمية من 100 كم/سا إلى 130 كم/سا، وهي الحالات التي -غالباً- ما يكون فيها وجود حارة إضافية للتسلق ضرورياً.
- عند الحاجة لحساب الطول الحرج لميول، أو سرعة تصميمية غير الواردة أعلاه، يمكن تطبيق العلاقة الدقيقة المستنتجة في البحث برقم 14؛ وذلك بإجراء عملية التكامل باستخدام أحد البرامج المخصصة لذلك، أو باستخدام إحدى الطرائق العددية التقريبية.
- استُنتجت العلاقاتان الدقيقة 14 والتقريبية 20 باستخدام مواصفات شاحنة ثقيلة نموذجية إذ:  
$$A=1000 \text{ kg.f/m}^2 \text{ و } A'=50 \text{ kg.f/hpp}$$
وفي حال كانت بلد الدراسة تتطلب حسابات باستخدام مواصفات شاحنة أخرى يجب عندها إعادة الحسابات بدءاً من العلاقة الأساسية رقم 8.
- نادراً ما تُتخذ حارة تسلق إضافية للطرق ذات حارات المرور المتعددة (المؤلفة من أربع حارات مرور على الأقل)، إلا أن بعض المصممين يلجؤون في بعض الحالات إلى إضافة هذه الحارة لتحسين مستوى خدمة الطريق إذا لزم الأمر، وفي هذه الحالة يمكن تطبيق العلاقة العلاقات الواردة في البحث لحساب الطول الحرج (موقع بداية حارة التسلق).



**8- المراجع\***

1. AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials). A policy on Geometric Design of Highway and streets, Washington, DC. AASHTO 6<sup>th</sup> edition, 2011.
2. Fred L. Mannering, Walter P. Kilareski, and Scott S. Washburn. "Principles of Highway Engineering and Traffic Analysis", John Wiley & Sons, Inc., 5<sup>th</sup> edition, 2013.
3. Lester A. Hoel, Nicholas J. Garber, and Adel W. Sadek. "Transportation Infrastructure Engineering, A Multimodal Integration", Cengage Learning, SI edition, 2011.
4. Lester A. Hoel and Nicholas J. Garber. "Traffic and Highway Engineering", Cengage Learning, SI edition, 2010.
5. R.C. Hibbeler. "Engineering Mechanics Statics and Dynamics", Pearson Prentice Hall, 12<sup>th</sup> edition in SI units, 200
6. NCHRP, (NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM). Review of Truck Characteristics as Factors in Roadway Design, WASHINGTON, D.C. Transportation Research Board 2003.