

Determining the Required Electric Power for the Traction of Electric Vehicle

Dr. Gaith Warkozek^{*}
Dr. Abbas Sandouk^{**}
Waseem Saeed^{***}

(Received 29 / 10 / 2017. Accepted 4 / 2 / 2018)

□ ABSTRACT □

Electric Vehicles EVs are the Vehicles that use electric motor powered by Fuel Cells, Batteries, or Ultra capacitors to drive the vehicle. EVs have many advantages over internal combustion engines such as zero emissions, high efficiency, quiet operation, smooth movement, and fuel independent. The traction torque should be determined according to vehicle's load that must be exceeded to move the vehicle at the required speed.

This study aims to analyze the mechanical forces applied on the vehicle, then modeling them to evaluate the traction power required for each case of operation. This model has four inputs which are: the required speed and acceleration, the road slope and vehicle's mass, and has the traction power as its output.

Keywords: Electric Vehicle, traction torque, traction power, speed

^{*}Assistant Professor– Power department– Mechanical and Electrical Engineering – Damascus University- Damascus- Syria

^{**}Professor – Power department– Mechanical and Electrical Engineering – Damascus University- Damascus- Syria

^{***}Postgraduate Student – Power department– Mechanical and Electrical Engineering – Damascus University- Damascus- Syria

تحديد استطاعة الجر الكهربائية المطلوبة لتحريك المركبات الكهربائية

الدكتور غيث ورقوزق*

الدكتور عباس صندوق**

وسيم سعيد***

(تاريخ الإيداع 29 / 10 / 2017. قُبل للنشر في 4 / 2 / 2018)

□ ملخص □

تعرف المركبات الكهربائية بالمركبات التي تستخدم المحركات الكهربائية في الجر والتي تستمد طاقتها الكهربائية من المدخرات أو خلايا الوقود أو المكثفات الفائقة. تمتلك هذه المركبات عدة مزايا عن مركبات التي تعتمد على محركات الاحتراق الداخلي مثل عدم وجود انبعاثات، المردود العالي وغير مرتبطة بتوافر الوقود بالإضافة لكونها هادئة وحركتها انسيابية. إن المشكلة الأساسية في هذه النظم هي تحديد استطاعة المحرك الكهربائي و كيفية قيادته مهما اختلفت ظروف التشغيل (طبيعة الطريق، سلوك السائق، توفر الطاقة الكهربائية في المركبة...).
قمنا في هذه الدراسة بتوصيف القوى التي تخضع لها المركبة مع نمذجتها لتحديد استطاعة الجر المطلوبة عند كل حالة تحميل تتعرض لها المركبة، حيث يجب تأمين هذه الاستطاعة لتحريك المركبة بالسرعة المطلوبة.
تم تطوير نموذج رياضي - حاسوبي للمركبة يتم فيه إدخال السرعة المطلوبة والتسارع المطلوب مع ميل الطريق وكتلة المركبة وعليه يتم تحديد قوى الجر على العجلات كخرج لهذا النموذج والذي يمكن الاستفادة منه في التحكم بمصدر التغذية الكهربائية الأمثل للمحرك الكهربائي.

الكلمات المفتاحية: المركبات الكهربائية، قوى الجر، استطاعة الجر، السرعة

* مدرس - قسم الطاقة الكهربائية - كلية الهمةك - جامعة دمشق - دمشق - سورية.

**أستاذ - قسم الطاقة الكهربائية - كلية الهمةك - جامعة دمشق - دمشق - سورية

***طالب دراسات عليا (دكتوراه) - قسم الطاقة الكهربائية - كلية الهمةك - جامعة دمشق - دمشق - سورية

مقدمة:

نظراً للانتشار الواسع لتقانات الطاقات المتجددة و النظيفة، أصبحت المركبات الكهربائية أكثر انتشاراً. لكن الصعوبة الحقيقية في تصميم و تنفيذ هذه النظم هي معرفة السلوك الديناميكي الحركي للمركبة من أجل التحكم بمصادر الطاقة الكهربائية المغذية للمركبة بالشكل الأمثل. سوف نقدم في هذا البحث نموذجاً رياضياً و حاسوبياً للمركبة الكهربائية بحيث سوف نعتد عليه لاحقاً في دراسة إدارة الطاقة الأمثل في المركبة. بدايةً سوف نستعرض النموذج الرياضي الواصف للمركبة ميكانيكياً، ثم سنقدم نموذجاً حاسوبياً في بيئة MATLAB/SIMULINK لتمثيل هذه المركبة ميكانيكياً.

يمكن توصيف عمل المركبة رياضياً لبيان أداء المركبة استناداً على الأساسيات الميكانيكية. حيث تتألف المركبة من آلاف المكونات المعقدة، لذلك لفهم آلية عملها بالشكل الأمثل لا بد من المعرفة الجيدة بالرياضيات والميكانيك الحركي مثل السرعة، التسارع و توزع القوى و العزوم أثناء الصعود أو الهبوط.. حيث يتحدد أداء الحركة للمركبة في اتجاه معين من خلال القوى التي تتعرض لها في نفس الاتجاه. يبين الشكل (1) القوى المطبقة على مركبة في حالة الصعود، حيث قوة الجر Tractive Force F_t (والتي تظهر في مساحة التماس بين العجلات والطريق) هي التي تحرك العربة للأمام والتي تنشأ من خلال العزم المنقول عبر علبة السرعة إلى العجلات. لكن عند تحرك المركبة هناك مقاومات تمنع هذه الحركة والتي تتألف من : [1][3][5]

○ مقاومة الدوران Rolling Resistance

○ الجر الأيروديناميكي Aerodynamic Drag

○ مقاومة الصعود Resistance Uphill

فحسب قانون نيوتن الثاني يعطى تسارع المركبة في الشكل التالي :

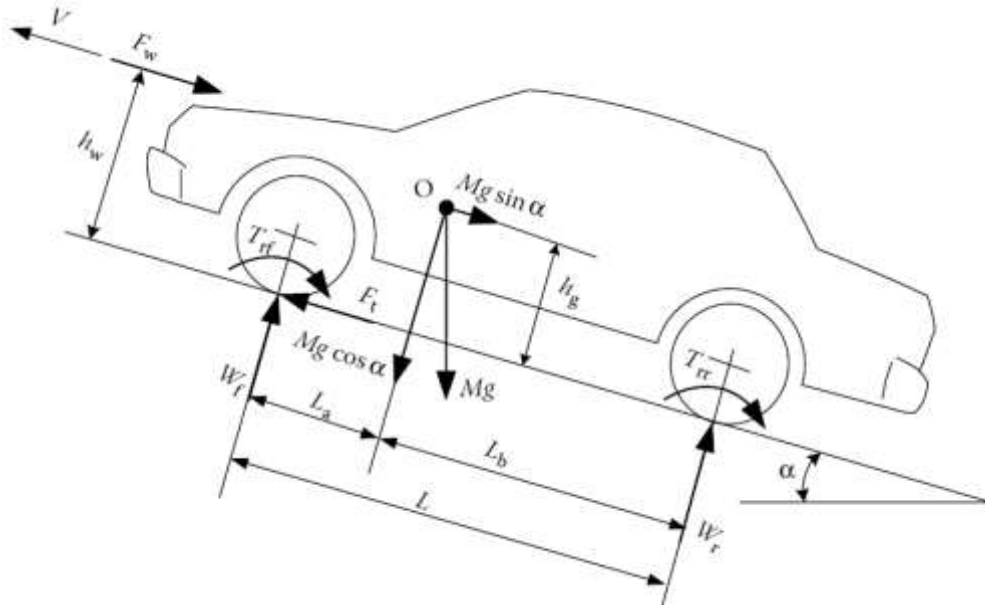
$$\frac{dV}{dt} = \frac{\sum F_t - \sum F_r}{\delta M} \quad (1)$$

حيث :

V : سرعة المركبة [m/s] ووزن المركبة الكامل [Kg]

$\sum F_t$: مجموع القوى التي تساعد على الجر $\sum F_r$: المقاومة الكلية [N]

δ : معامل الكتلة الذي يكافئ تحويل عزوم عطالة الأجزاء الدوارة إلى كتلة مضافة



شكل (1): القوى المطبقة على المركبة

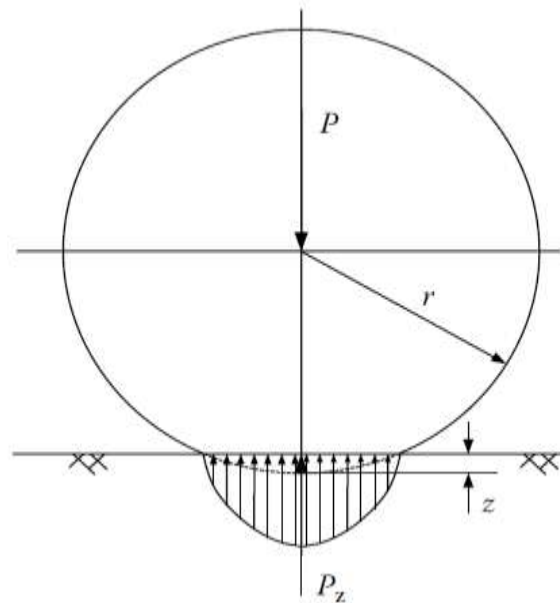
النتائج والمناقشة:

1- مقاومة المركبة:

يبين السابق الشكل (1) القوى المقاومة التي تعاكس حركة المركبة والتي كما ذكرنا تتألف من مقاومة الدوران والتي تتمثل على الشكل (1) كعزوم مقاومة الدوران الأمامية والخلفية T_{rr} و T_{rr} ويضاف لها قوة الدفع الأيروديناميكي F_w ومقاومة الصعود والتي تتمثل على الشكل بالحد $M.g. \sin \alpha$ حيث سيتم الشرح التفصيلي لكل منها في الفقرات الآتية.

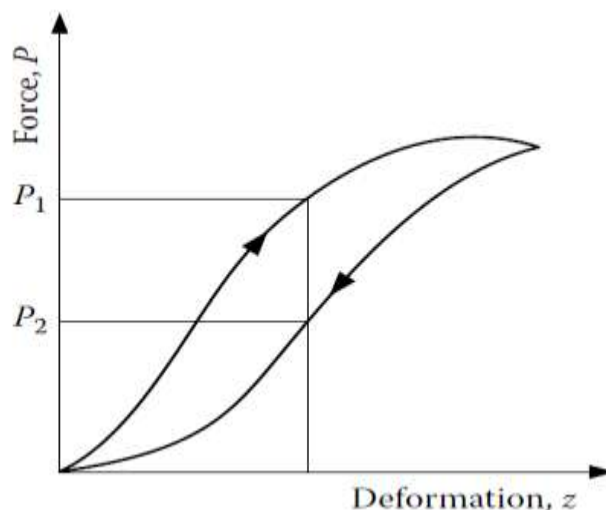
1-1 مقاومة الدوران Rolling Resistance

تنشأ مقاومة العجلات على الأسطح القاسية Hard Surfaces نتيجة النقلص في مادة العجلات أو ما يسمى بطاء مادة العجلات Hysteresis حيث يبين الشكل (2) توزيع القوى على العجلة في حالة الوقوف.



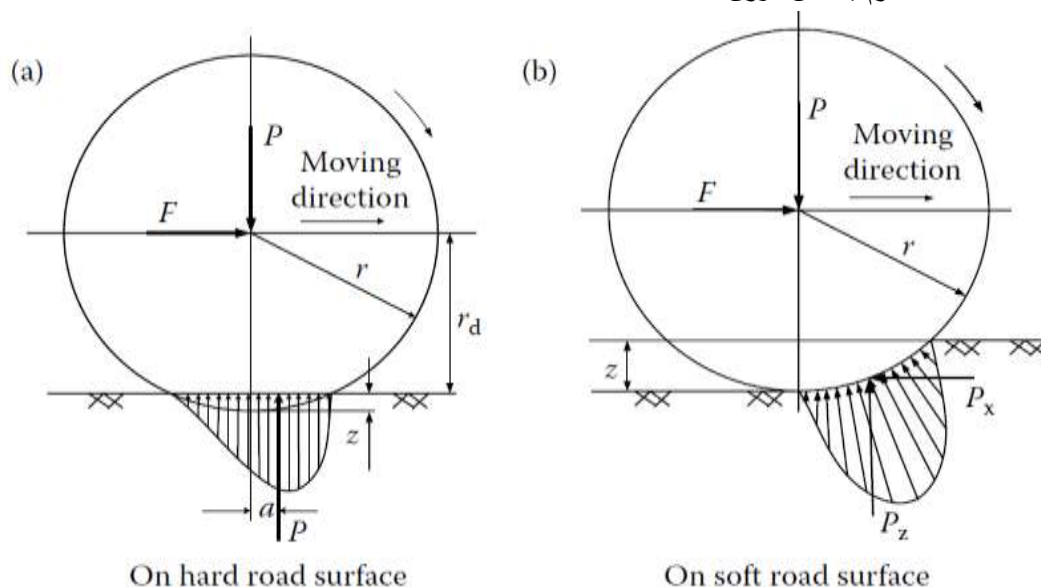
الشكل (2): توزيع الضغط في منطقة التماس

حيث تؤثر القوة P على مركز العجلة بينما يتوزع الضغط بين العجلة والأرض بشكل متماثل على الخط المركزي ويكافؤها قوة P_z مع حامل P حيث يتم تمثيل التباطؤ للعجلة في حالة التحميل وعدم التحميل بما يسمى التشوه Deformation ويرمز له z ، حيث نلاحظ كما في الشكل (3) أنه عند نفس التشوه في مادة المطاط فإنه خلال التحميل القوة المطبقة أكبر منها خلال عدم التحميل.



الشكل (3): تغير القوى المطبقة على العجلة مع عامل التشوه عند التحميل وعدمه [1][2][4]

وبين الشكل (4-a) دوران العجلة فالنصف الأمامي لمنطقة التماس محمل بينما الجزء الخلفي غير محمل. مما يجعل البطء يسبب توزعاً غير متماثل للقوى مع الأرض فيكون الضغط في النصف الأمامي أكبر من النصف الخلفي، هذه الظاهرة تتعكس على شكل انزياح a في قوة الاحتكاك مع الأرض حيث تضاف هذه القوة مع القوة على مركز العجلة لتشكل عزم يعاكس دوران العجلة.



الشكل (4): التشوه في العجلة مع مقاومة الدوران على a الأسطح القاسية و b الأسطح الطرية [5] [1]

- ملاحظة: تنتج على الأسطح الناعمة مقاومة الدوران نتيجة التشوه في سطح الأرض كما في الشكل (b-4) حيث تنزاح قوة الاحتكاك باتجاه النصف الأمامي بشكل كامل ويصبح لها مركبتان.

العزم الناتج عن هذه القوة يسمى عزم مقاومة الدوران ويعطى بالعلاقة: [1][3][5]

$$T_r = P \cdot a \quad (2)$$

وللحفاظ على دوران العجلة لابد من تطبيق قوة F على مركز العجلة لإلغاء عزم مقاومة الدوران وهي تعطى

بالعلاقة :

$$F = \frac{T_r}{r_d} = \frac{P \cdot a}{r_d} = P \cdot f_r \quad (3)$$

حيث: r_d هي نصف القطر الفعال للعجلة [Effective Radius[m]

$f_r = a/r_d$ تدعى مقاومة الاحتكاك

a هو مقدار الانزياح الأفقي الناتج عن تشوه العجلة بين القوة ومركز العجلة [m]

وبالتالي يمكن تمثيل قوة مقاومة الدوران على شكل قوة أفقية تعمل على مركز العجلة بشكل معاكس للدوران

ومطالها هو:

$$F_r = P \cdot f_r \quad (4)$$

حيث: P هي القوة العاملة الطبيعية Normal Acting Force على مركز العجلة الدائرية.

أما في حال السير على منزلق يتم استبدال هذه القوة بالمركبة العمودية على سطح الطريق حصراً والتي تكافئ:

$$F_r = P \cdot f_r \cdot \cos \alpha \quad (5)$$

حيث α زاوية ميل الطريق كما في الشكل (1).

إن المعامل f_r يتبع لنوع مادة العجلة Tire Material وبنية العجلة Tire Structure وضغط النفخ Inflation

Pressure ومدى قساوة الطريق Road Roughness ومادة الطريق ووجود وعدم وجود السوائل على الطريق.

وحديثاً لتخفيض معدل استهلاك الوقود يجب أن يكون هذا المعامل أقل من 0.01، لكن هذه القيمة لا تأخذ بعين

الاعتبار سرعة حركة العجلة، حيث يمكن بناءً على التجارب الوصول لمعادلة تجريبية لحساب هذا المعامل، حيث

يكفي اعتباره متغير بشكل خطي مع السرعة. و منه عند الضغوط الشائعة للعجلات يمكن استخدام العلاقة التالية :

[1][3][5]

$$f_r = 0.01 \left(1 + \frac{V}{160} \right) \quad (6)$$

يمكن تعطي هذه المعادلة قيم بدقة مقبولة بسرعات حتى 128 km/h.

2-1 الجر الأيروديناميكي: Aerodynamic Drag

عند تحرك المركبة ضمن الهواء تواجه قوة تمنع حركتها، تدعى هذه القوة بالجر الأيروديناميكي والذي يتكون

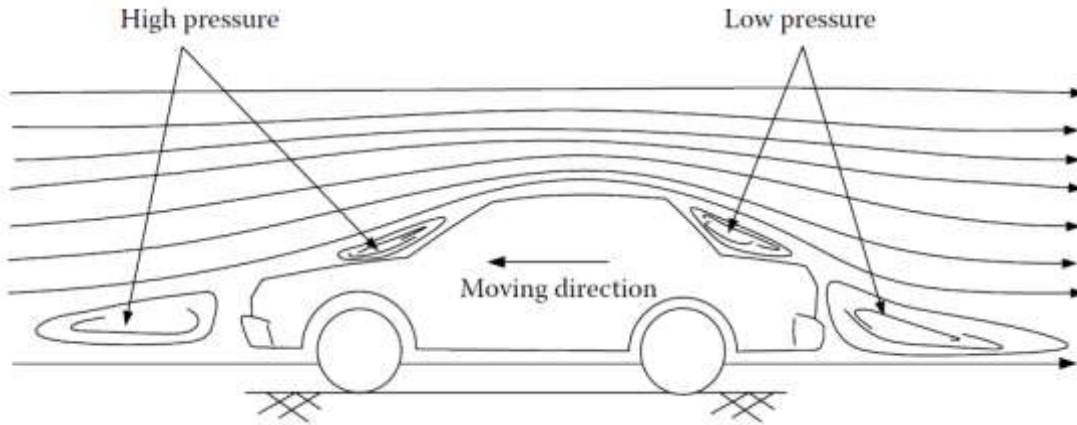
من مركبتين

جر الشكل Shape Drag

واحتكاك البشرة Skin Friction حيث:

جر الشكل Shape Drag

نتيجة حركة المركبة للأمام يتم دفع الهواء مع اتجاه المركبة الأمر الذي يؤدي لزيادة الضغط في المقدمة كون الهواء غير قادر على الانزياح بشكل لحظي مع حركة المركبة. وكذلك الهواء خلف المركبة لا يمكن أن يملأ الفراغ المتروك خلفها بشكل لحظي، مما يشكل منطقة ذات ضغط منخفض، وبالتالي حركة المركبة للأمام تخلق منطقتين ضغط تعاكس حركتها كما في الشكل (5)، حيث هناك قوة تدفع المركبة باتجاه الخلف (منطقة الضغط المرتفع) وقوة تسحب المركبة للخلف (منطقة الضغط المنخفض)، محصلة هذه الضغوط يعبر عنه بقوة جر الشكل 5 وسميت بذلك نظراً لاعتمادها الكامل على شكل المركبة.



شكل (5): قوة جر الشكل

احتكاك البشرة Skin Friction:

إن الهواء القريب من سطح المركبة يتحرك تقريباً بنفس سرعة المركبة، بينما الهواء البعيد عن سطح المركبة يبقى ثابتاً، بالتالي فإنجزئيات الهواء بين سطح المركبة والأجزاء البعيدة عنها تحنك مع بعضها البعض نتيجة تحركها بسرعات متفاوتة .

إن قوة الجر الأيروديناميكية تابعة لمربع سرعة المركبة والمساحة الأمامية $A_f [m^2]$ وشكل المركبة وكثافة الهواء $\rho [Kg/m^3]$ بحيث يعبر عنها بالعلاقة: [1][3][5]

$$F_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_f \cdot C_D \cdot (v - v_w)^2 \quad (7)$$

حيث C_D هو معامل الجر وهو يتبع لشكل المركبة.

بينما v_w هي مركبة سرعة الهواء $[m/s]$ باتجاه المركبة ولها إشارة موجبة إذا كانت بنفس الاتجاه وسالبة إذا كانت معاكسة له.

3-1 مقاومة التدرج: Grading Resistance

يُنتج الثقل مركبة دائماً تكون عامودية ونحو الأسفل سواء كانت المركبة تتحرك صعوداً أو هبوطاً. هذه المركبة إما أن تعاكس قوة الجر (عند الصعود) أو تساعد قوة الجر (عند الهبوط). لكن عند دراسة وتحليل أداء المركبة يتم اعتبار هذه القوة فقط عند الصعود وتسمى بمقاومة التدرج وتعطى بالعلاقة: [1][3][5]

$$F_g = M \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (8)$$

ويمكن التبسيط أكثر باستخدام ما يعرف بقيمة التدرج Grade Value i وذلك عندما تكون α صغيرة حيث كما

في الشكل (1):

$$i = \frac{H}{L} = \tan \alpha \approx \sin \alpha \quad (9)$$

في بعض المراجع يتم دمج مقاومة التدرج Grading Resistance مع مقاومة الدوران Rolling Resistance بما يسمى مقاومة الطريق Road Resistance والذي يعطى بالعلاقة :

$$F_{rd} = F_f + F_g = M \cdot g \cdot (f_r \cdot \cos \alpha + \sin \alpha) \quad (10)$$

وعندما تكون α صغيرة تصبح العلاقة على الشكل التالي:

$$F_{rd} = F_f + F_g = M \cdot g \cdot (f_r + i) \quad (11)$$

4-1 المعادلة الديناميكية Dynamic Equation

عند الحركة الانسحابية للمركبة، تظهر القوى الرئيسية العاملة على مركبة بمحورين كما في الشكل (1) مقاومة الدوران للمحور الأمامي F_{rf} ومقاومة الدوران للمحور الخلفي F_{rr} والتي تقابلها عزوم مقاومة الدوران T_{rf} ، T_{rr} والجر الأيروديناميكي F_w ومقاومة الصعود F_g ، بالإضافة لقوى الجر المطلوبة لتحريك المركبة F_{tr} ، F_{tf} . فإذا كانت المركبة ذات دفع أمامي كانت $F_{tr}=0$ وإذا كانت ذات دفع خلفي كان $F_{tf}=0$ وبالتالي فإن المعادلة الديناميكية اللازمة لتحريك المركبة تكون على النحو: [1][3][5]

$$M \frac{dV}{dt} = (F_{tf} + F_{tr}) - (F_{rf} + F_{rr} + F_w + F_g) \quad (12)$$

حيث dV/dt هي التسارع و M كتلة السيارة .

الحد الأول في الطرف اليمين يمثل مجهود الجر الكلي Total Tractive Effort والحد الثاني المقاومة Resistance.

ولتحديد قوة الجر الأعظمية التي يمكن لمنطقة التماس بين العجلة والأرض تحملها، لابد من تحديد الحمل الطبيعي على كل محور وذلك بجمع العزوم لكل القوى حول النقطة R (النقطة منتصف منطقة التماس بين العجلة والأرض) فيكون الحمل الطبيعي على المحور الأمامي: [1][3][5]

$$W_f = \frac{M \cdot g \cdot L_b \cdot \cos \alpha - (T_{rf} + T_{rr} + F_w \cdot h_w + M \cdot g \cdot h_g \sin \alpha + M \cdot h_g \cdot dV/dt)}{L} \quad (13)$$

بينما على المحور الخلفي: [1][3][5]

$$W_r = \frac{M \cdot g \cdot L_a \cdot \cos \alpha + (T_{rf} + T_{rr} + F_w \cdot h_w + M \cdot g \cdot h_g \sin \alpha + M \cdot h_g \cdot dV/dt)}{L} \quad (14)$$

لكن غالباً ما يتم اعتبار h_w قريب من ارتفاع مركز الثقل h_g في مركبات نقل الركاب لذلك تصبح العلاقات:

$$W_f = \frac{L_b}{L} M \cdot g \cdot \cos \alpha - \frac{h_g}{L} \left(F_w + F_g + M \cdot g \cdot f_r \cdot \frac{r_d}{h_g} \cdot \cos \alpha + M \cdot \frac{dV}{dt} \right) \quad (15)$$

$$W_r = \frac{L_a}{L} M \cdot g \cdot \cos \alpha + \frac{h_g}{L} \left(F_w + F_g + M \cdot g \cdot f_r \cdot \frac{r_d}{h_g} \cdot \cos \alpha + M \cdot \frac{dV}{dt} \right) \quad (16)$$

وبالاعتماد على معادلة التسارع يصبح الحمل الطبيعي الأمامي و الخلفي على النحو: :

$$W_f = \frac{L_b}{L} M \cdot g \cdot \cos \alpha - \frac{h_g}{L} \left(F_t - F_r \left(1 - \frac{r_d}{h_g} \right) \right) \quad (17)$$

$$W_r = \frac{L_a}{L} M. g. \cos \alpha + \frac{h_g}{L} \left(F_t - F_r \left(1 - \frac{r_d}{h_g} \right) \right) \quad (18)$$

حيث: F_t هي جهد الجر الكلي $F_t = F_{tr} + F_{fr}$

F_r هي قوة مقاومة الدوران الكلية

وبالتالي جهد الجر الأعظمي الذي يمكن لمنطقة التماس بين العجلة والطريق تحمله (والذي تجاوزه يؤدي لانزلاق العجلة على الطريق دون تحريك المركبة) يعطى بجداء الحمل الطبيعي مضروباً بمعامل μ وهو معامل التصاق الطريق (Frictional Coefficient) أحياناً يسمى معامل الاحتكاك (Frictional Coefficient).

وبالتالي تصبح معادلة قوة مقاومة الدوران على المحور الأمامي :

$$F_{t \max} = \mu. W_f = \mu \left[\frac{L_b}{L} M. g. \cos \alpha - \frac{h_g}{L} (F_{t \max} - F_r (1 - \frac{r_d}{h_g})) \right] \quad (19)$$

قوة مقاومة الدوران على المحور الخلفي :

$$F_{t \max} = \mu. W_r = \mu \left[\frac{L_a}{L} M. g. \cos \alpha + \frac{h_g}{L} (F_{t \max} - F_r (1 - \frac{r_d}{h_g})) \right] \quad (20)$$

5-1 التصاق العجلة بالأرض وجهد الجر الأعظمي: Tire-Ground Adhesion and Maximum

Tractive Effort

كما وجدنا عند زيادة قوة الجر عن الحد الأعظمي تبدأ العجلات بالدوران على الأرض دون حركة بسبب خاصية الالتصاق، وهذا يعتبر أحد أهم المعوقات لأداء المركبات خاصة عند السير على أرض رطبة أو جليدية أو مغطاة بالثلج أو عند السير على تربة طرية. وبالتالي قوة الجر الأعظمية على المحاور لا يحددها عزم المحرك إنما الخصائص الالتصاقية للعجلات مع الأرض.

حيث وجد تجريبياً وعند الأنواع المختلفة للأرض أن قوة الجر الأعظمية تتعلق بمعامل يسمى معامل الانزلاق

S (يكون صفر في الأرض الجافة) والذي يعطى بالعلاقة : [1][3][5]

$$S = \left(1 - \frac{V}{r. \omega} \right). 100\% \quad (21)$$

• V سرعة مركز العجلة (سرعة العربة)

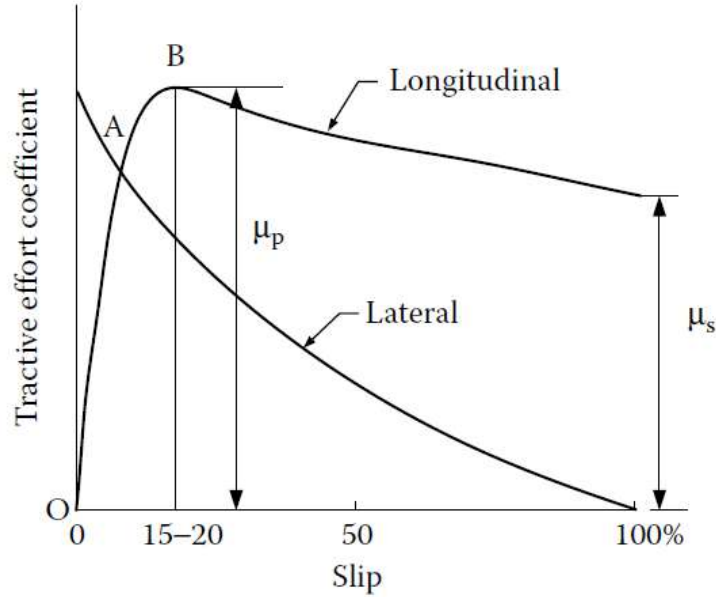
• ω السرعة الزاوية للعجلة

• r نصف قطر العجلة عند الدوران الحر

في حالة الجر تكون V أصغر من $r. \omega$ (لتغير القطر الفعال للعجلة) وبالتالي الانزلاق يكون موجب وأصغر من الواحد. وكما ذكرنا قوة الجر العظمى تتبع لمعامل الالتصاق μ الذي سمي بمعامل مجهود الجر والذي يتعلق بمعامل الانزلاق كما في الشكل (6) :

$$F_x = P \cdot \mu(S) \quad (22)$$

حيث P هو الحمل العامودي للعجلة.



شكل (6): تغير معامل قوة الجر مع الانزلاق عند الحركة الطولية^{[1][2][4]}

بأخذ المنحني عند الحركة الطولية هناك جزء من المنحني OA يكون فيه الانزلاق صغيراً وشبه خطي وقوة الجر تتناسب طردياً مع الانزلاق، حيث هنا الانزلاق الصغير ناتج عن مرونة العجلة أكثر من الانزلاق بينها وبين الأرض في منطقة الاتصال. عند تطبيق عزم جر على العجلة ستقوم قوة الجر بضغط منطقة الاتصال والجهة الأمامية للعجلة والذي ينعكس على شكل تشوه في شكل العجلة، وزيادة قوة الجر أكثر تصبح العلاقة غير خطية بينها وبين الانزلاق (المنطقة AB) حيث يتم الوصول إلى أعظم قوة جر عند انزلاق بحدود 15-20% وعند زيادة الانزلاق عنها تصبح حالة العمل غير مستقرة ويبدأ μ بالتناقص بشكل كبير من القيمة العظمى إلى قيمة μ_s كما في الشكل (7). لذلك نسعى دائماً للعمل عند انزلاق أقل من 15-20% ويبين الجدول (1) قيم μ الوسطية والعظمى عند الطرق المختلفة.

جدول (1): قيم الانزلاق الحدية عند الطرق المختلفة^{[1][3][5]}

Surface	Peaking Values, μ_p	Slipping Values, μ_s
Asphalt and concrete (dry)	0.8-0.9	0.75
Concrete (wet)	0.8	0.7
Asphalt (wet)	0.5-0.7	0.45-0.6
Gravel	0.6	0.55
Earth road (dry)	0.68	0.65
Earth road (wet)	0.55	0.4-0.5
Snow (hard packed)	0.2	0.15
Ice	0.1	0.07

6-1 جهد الجر وسرعة المركبة: Power Train Tractive Effort and Vehicle Speed

تنتقل السرعة والعزم من محور الخرج للمحرك إلى العجلات عبر باقي العناصر، حيث يستخدم فاصل حركة لفصل ووصل المحرك عن ومع علبه السرعة، وبعدها تقوم علبه السرعة بنقل العزم عبر سرعات مختلفة من محور الدخل إلى محور الخرج وذلك حسب حاجة الحمل. بعدها نصل إلى القيادة النهائية Final Drive التي تتألف من مبدلات سرعة أيضاً لتخفيض السرعة وتوزيع العزم على العجلات عبر المفاضل Differential وبالتالي العزم الواصل للعجلات: [1][4]

$$T_w = i_g \cdot i_0 \cdot \eta_t \cdot T_p \quad (23)$$

حيث i_g هي نسبة علبه السرعة $i_g = N_{in}/N_{out}$ حيث N_{in} السرعة على الدخل و N_{out} السرعة على الخرج، i_0 نسبة السرعة في القيادة النهائية، η_t المرود من المحرك إلى العجلات، T_p عزم المحرك. وكما وجدنا قوة الجر: [1][4]

$$F_t = \frac{T_w}{r_d} = \frac{i_g \cdot i_0 \cdot \eta_t \cdot T_p}{r_d} \quad (24)$$

أما سرعة دوران العجلات فهي:

$$N_w = \frac{N_p}{i_g \cdot i_0} \quad (25)$$

N_p سرعة دوران المحرك

أما السرعة الخطية لمركز العجلة فتكون:

$$V = \frac{\pi \cdot N_w \cdot r_d}{30} = \frac{\pi \cdot N_p \cdot r_d}{30 \cdot i_g \cdot i_0} \quad (26)$$

أما السرعة الأعظمية للمركبة فهي أعظم سرعة يمكن أن تصل لها المركبة عند تحميل المحرك بالحمل الكامل وعلى طريق أفقي. ونحصل عليها عند التساوي بين مجهود الجر والقوى المقاومة، أو من خلال سرعة المحرك الأعظمية مقسومة على نسبة علبه السرعة. وبأخذ الخيار الأول وباعتبار الحركة على طريق أفقية:

$$F_t = \frac{i_g \cdot i_0 \cdot \eta_t \cdot T_p}{r_d} = M \cdot g \cdot f_r + \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho_a \cdot A_f \cdot V^2 \quad (27)$$

أما باستخدام الخيار الثاني نسبة سرعة المحرك الأعظمية لنسبة علبه السرعة يكون:

$$V_{max} = \frac{\pi \cdot N_{pmax} \cdot r_d}{30 \cdot i_{gmin} \cdot i_0} \quad (28)$$

أما في حال الحركة على طريق منحدر يعبر عن أعظم سرعة يمكن الوصول إليها عند زاوية ميل معينة

Grade Angle على الشكل التالي وذلك بفرض المركبة تصعد على طريق بميل صغير $i = \sin \alpha$:

$$F_t = \frac{i_g \cdot i_0 \cdot \eta_t \cdot T_p}{r_d} = M \cdot g \cdot f_r + \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho_a \cdot A_f \cdot V^2 + M \cdot g \cdot i \quad (29)$$

وبالتالي:

$$i = \frac{i_g \cdot i_0 \cdot \eta_t \cdot T_p / r_d - M \cdot g \cdot f_r - \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho_a \cdot A_f \cdot V^2}{M \cdot g} = d - f_r \quad (30)$$

حيث:

$$d = \frac{F_t - F_w}{M \cdot g} = \frac{i_g \cdot i_0 \cdot \eta_t \cdot T_p / r_d - \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho_a \cdot A_f \cdot V^2}{M \cdot g} \quad (31)$$

ويسمى d معامل الأداء Performance Factor.**7-1 أداء التسارع: Acceleration Performance**

يتحدد أداء التسارع للمركبة من خلال زمن التسارع والمسافة المقطوعة للانتقال من السرعة 0 إلى سرعة معينة على أرض مستوية، فحسب قانون نيوتن الثاني: [1][3][4][5]

$$a = \frac{dV}{dt} = \frac{F_t - F_w - F_f}{M \cdot \delta} = \frac{g}{\delta} (d - f_r) \quad (32)$$

حيث δ يسمى معامل العطالة الدوارة Rotational Inertia Factor والذي يعبر كما ذكرنا عن الكتلة المضافة لكتلة المركبة نتيجة العزوم الدوارة المكافئة للأجزاء الدوارة في المركبة ويعطى بالعلاقة:

$$\delta = 1 + \frac{I_w}{M \cdot r_d^2} + \frac{i_0^2 \cdot i_g^2 \cdot I_p}{M \cdot r_d^2} \quad (33)$$

حيث I_w عزم العطالة الدوار للعجلات [N.m] و I_p عزم العطالة الدوار لباقي الأجزاء الدوارة [N.m] والتي من الصعب معرفتها لذلك يمكن اختصار هذه العلاقة في مركبات الركاب بحيث تصبح:

$$\delta = 1 + \delta_1 + i_0^2 \cdot i_g^2 \cdot \delta_2 \quad (34)$$

حيث δ_1 يقدر بحوالي 0.04 و δ_2 حوالي 0.0025 وغالباً ما يؤخذ أثره بإضافة 5% إلى الوزن الكلي للمركبة في معادلة التسارع.

ويتحدد التسارع بالزمن اللازم لتسارع المركبة من السرعة 0 إلى السرعة النهائية V_f وهو المحدد الأهم في مركبات نقل الركاب وهو الذي يحدد استطاعة المحرك، و يعطى الزمن بالعلاقة (37) والذي يمكن كتابته بالشكل:

$$t_a = \int_0^{V_f} \frac{M \cdot \delta}{P_t / V - M \cdot g \cdot (f_r + i) - \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho_a \cdot A_f \cdot V^2} \cdot dV \quad (35)$$

وبإهمال أثر المقاومة يكون زمن التسارع:

$$t_a = \frac{M \cdot \delta}{2 \cdot P_t} \cdot V_f^2 \quad (36)$$

2- المعادلة النهائية لاستطاعة الجر:

كما وجدنا سابقاً، هناك مركبتين لاستطاعة الجر مركبة عند التسارع وعند العمل عند سرعة ثابتة. تظهر مركبة الاستطاعة بعد ضرب القوة بالسرعة فتصبح علاقة الاستطاعة النهائية بعد أخذ التسارع بعين الاعتبار على النحو الآتي:

$$P_t = M \cdot g \cdot (f_r \cdot \cos \alpha + \sin \alpha) \cdot V + \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho_a \cdot A_f \cdot V^3 + M \cdot \delta \cdot \frac{dV}{dt} \cdot V \quad (37)$$

لكن الاحتكاك في علب السرعة ونقاط الوصل تولد ضياعاً ميكانيكياً حيث يعطى المردود الميكانيكي للعناصر على الشكل التالي: [1][6]

- المحرك الكهربائي: باعتبار محرك مصنف من النوع IE2 يكافئ مردود حوالي 95%

- فاصل الحركة Clutch : 99%

- زوج مبدلات السرعة الواحد Each pair of gears 95-97%

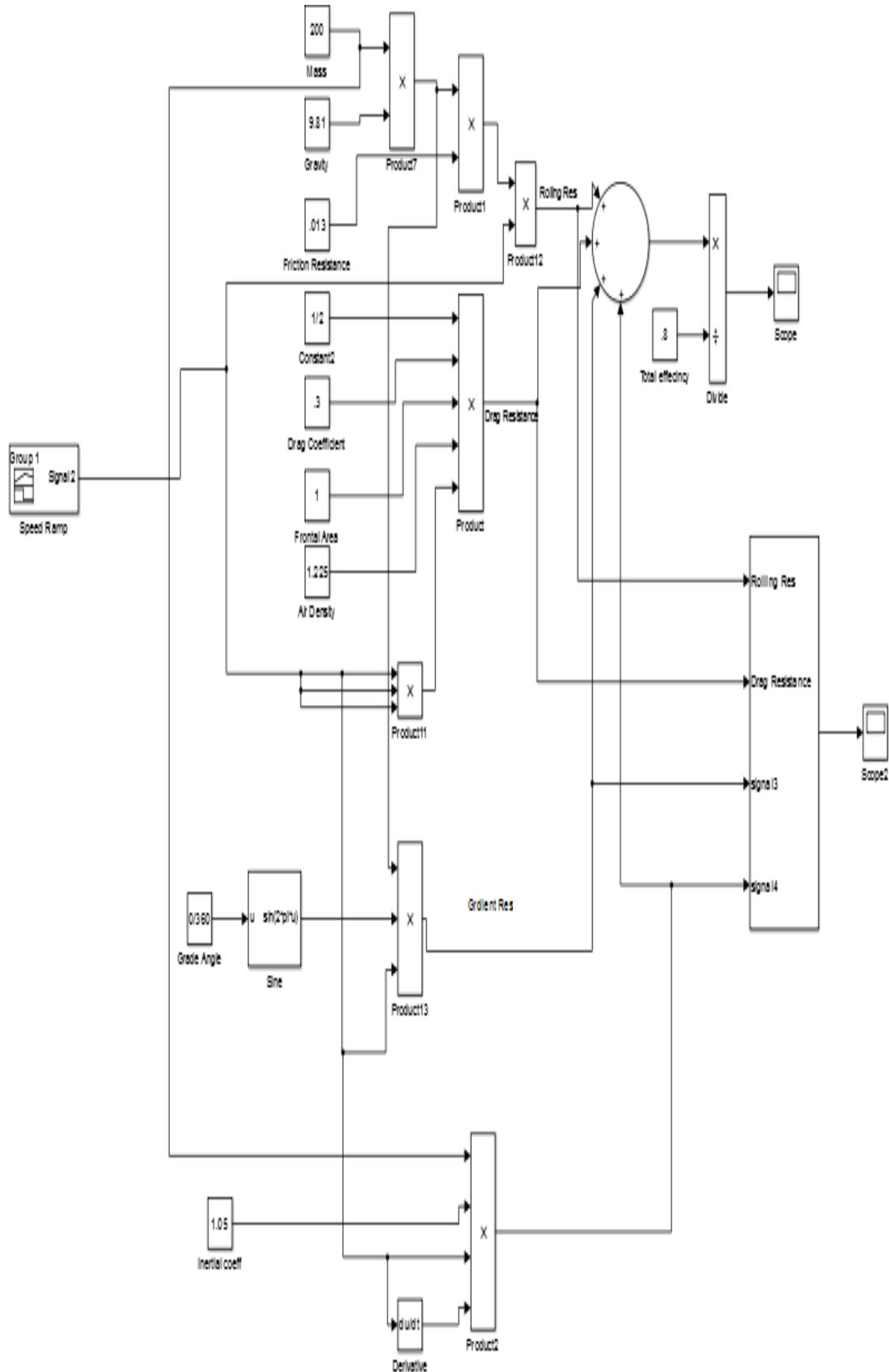
- الربط والاتصال Bearing and joint 98-99%

وبالتالي η_t هو جداء هذه المراديد ويكافئ تقريباً 90%، والاستطاعة الكهربائية تكون بتقسيم الاستطاعة الميكانيكية على المردود الكلي.

قمنا بعد وضع النموذج الرياضي لمعادلة الحركة للمركبة ميكانيكياً بتنفيذ نموذج حاسوبي لهذه المعادلات.

3- نمذجة المعادلات الحركية للمركبة حاسوبياً:

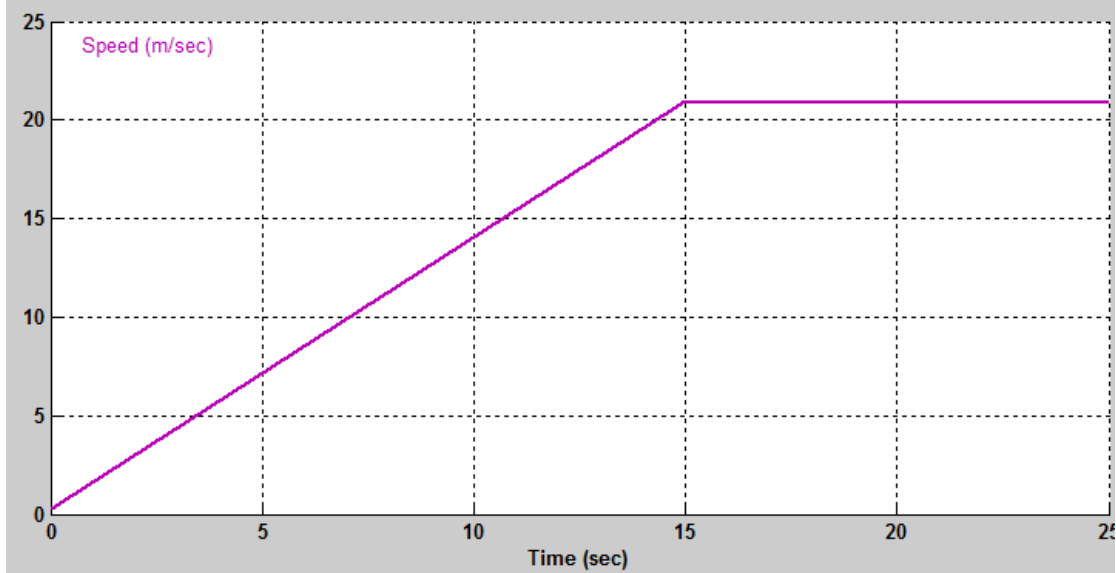
بأخذ المعادلة (37) وبعد تحديد مرحلة التسارع والثبات وباعتبار أن التسارع هو الوصول إلى سرعة 75 كم في الساعة خلال 15 ثانية، وبفرض عربة ذات وزن 200 كيلو غرام ومساحة أمامية 1 متر مربع مع معامل جر 0.3 ومقاومة احتكاك 0.013 مع منحدر بزاوية ميل 5 درجات، تم إجراء النمذجة في بيئة الماتلاب وفق النموذج المبين في الشكل (7):



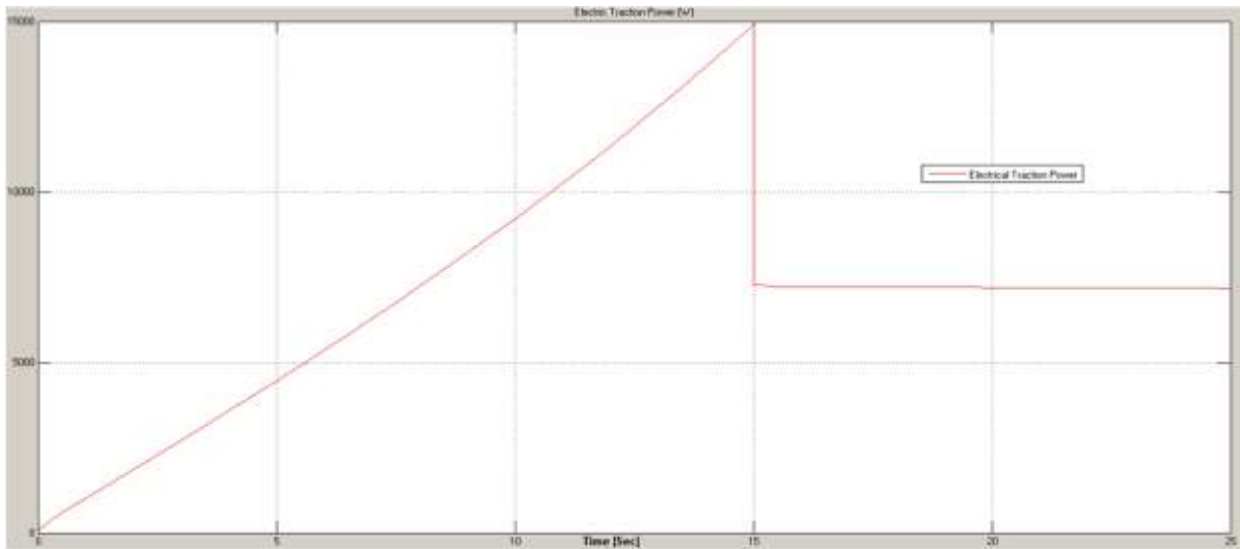
الشكل (7): النموذج الرياضي لمعادلة استطاعة الجر

4- التطبيق:

تبين أنه عند تشغيل المركبة وفق منحنى السرعة المبين في الشكل (8) كانت استطاعة الجر الكهربائية كما في الشكل (9).

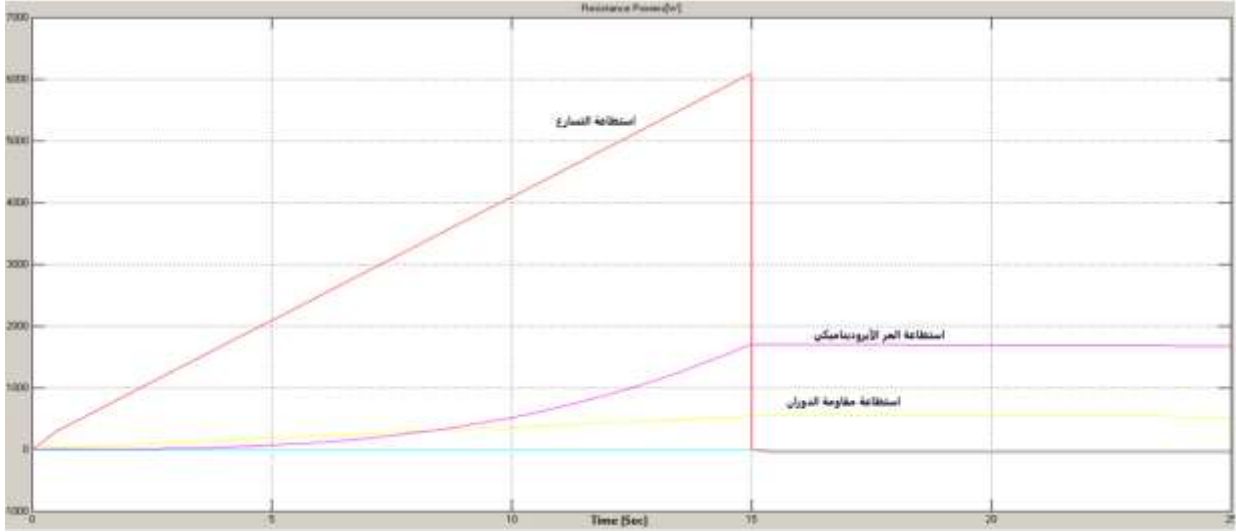


الشكل (8): إشارة السرعة المطبقة



الشكل (9): شكل منحنى استطاعة الجر الكهربائية

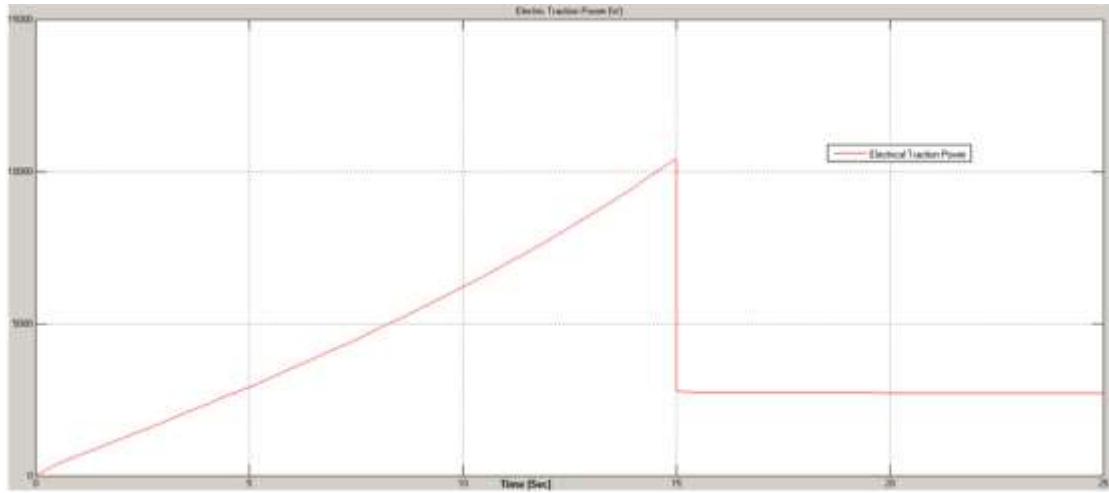
نلاحظ من الشكل (9) أن الاستطاعة الأعظمية اللازمة للتسارع تقدر بحوالي 15 كيلو واط بينما عند ثبات السرعة تنخفض الاستطاعة المطلوبة إلى حوالي 7200 واط أي تنخفض بحدود النصف، أما مشاركة الاستطاعة للتغلب على المقاومات فهي وفق الشكل (10):



الشكل(10): الاستطاعات المطلوبة للتغلب على المقاومات

حيث يمثل المنحني العلوي استطاعة التسارع والذي ينعدم عند ثبات السرعة والمنحني الثاني يمثل استطاعة الصعود أما الثالث استطاعة الجر الأيروديناميكي والمنحني الأخير هو منحني الاحتكاك. حيث نلاحظ أن التسارع له الحصة الأكبر، ثم يليه الصعود والذي كلما انخفضت سرعة الحركة فيه انخفضت الاستطاعة، ثم ينعدم في حال الحركة على طريق أفقي، أما استطاعة الجر الأيروديناميكي فلها علاقة بسرعة المركبة والمساحة الأمامية التي تتعرض للهواء، أما استطاعة الاحتكاك فهي الأقل باعتبار الطريق اسفلتي معبداً من الأفضل وضع سيناريو لحالة طريق أفقي - صعود - أفقي - هبوط و رسم شكل العزوم و التسارع.

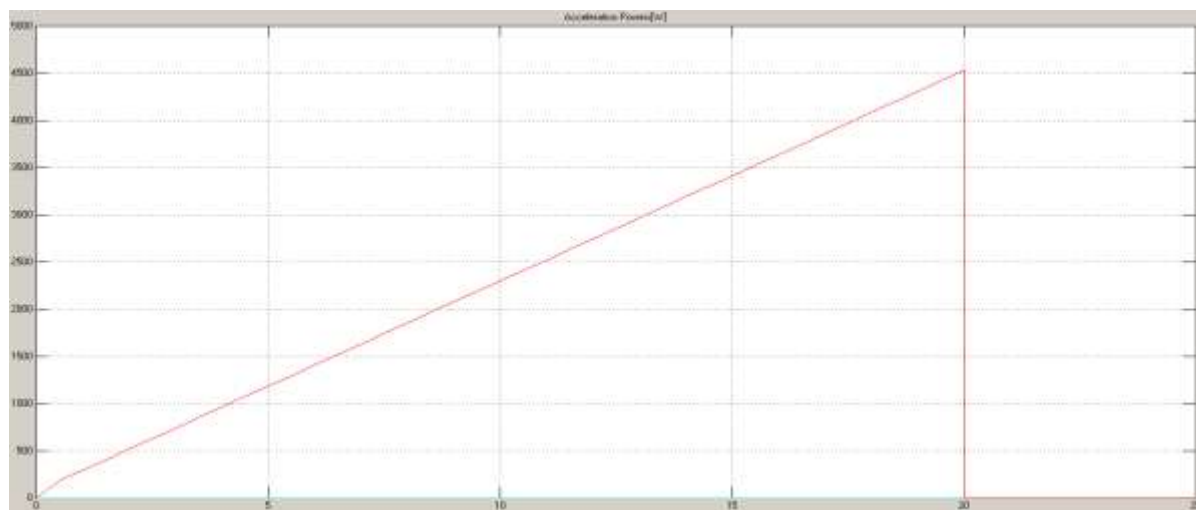
ففي حال السير على طريق أفقي تنخفض الاستطاعة الكلية المطلوبة إلى النصف تقريباً كما في الشكل(11):



الشكل(11): شكل منحني استطاعة الجر الكهربائية على طريق أفقي

أما في حال زيادة زمن التسارع إلى 20 ثانية نلاحظ انخفاض الاستطاعة اللازمة للتسارع بحدود 25% كما في

الشكل(12):



الشكل (12): شكل منحنى استطاعة التسارع عند تخفيض زمن التسارع

الاستنتاجات والتوصيات:

تبين لنا من نموذج المحاكاة أن أكبر الاستطاعة المطلوبة تكون عند التسارع من الصفر وكلما كانت قيمة التسارع المطلوب أقل كانت الاستطاعة المطلوبة أقل، حيث وجدنا عند زيادة زمن التسارع إلى 20 ثانية انخفضت الاستطاعة المطلوبة للتسارع بحدود 25%.

لذلك كانت السيارات الكهربائية ذات معدلات تسارع أخفض من المركبات العادية، وذلك لتخفيض استطاعة المحرك الكهربائي من جهة وتخفيض السحب من منابع من جهة أخرى مما يطيل من المسافة الممكن قطعها. التسارع أثناء الصعود يجب أن يكون أخفض منه عند السير على خط أفقي حيث وجدنا أن الاستطاعة تتضاعف عند صعود منحدر مائل بزاوية 5 درجات.

قيمة النتائج التي حصلنا عليها قريبة من قيم المحركات المستخدمة حقيقة في المركبات الكهربائية والتي تتوافق مع وزن المركبة.

وكذلك وجدنا أن اختلاف السرعة و ظروف العمل يؤثر بشكل متفاوت على استطاعة المحرك المستجرة وهو الأمر الذي سيستخدم في خوارزمية التحكم.

تم في هذا البحث تحديد القوى الميكانيكية (المعوقة) في المركبات الكهربائية وتحديد الاستطاعة اللازمة للتغلب على كل منها وكذلك الاستطاعة الكهربائية الكلية المطلوبة للحركة، تم وضع نموذج رياضي يوصف هذه القوى. كما تم تصميم نموذج حاسوبي في بيئة الماتلاب يمكننا من تحديد الاستطاعة الكهربائية المطلوبة في كل لحظة تشغيل، الأمر الذي يمكننا من المراقبة اللحظية لاستطاعة المحرك في حال استبدال إشارة السرعة بإشارة حقيقة وبالتالي سنتمكن لاحقاً من تحديد منبع التغذية الأمثل للعمل.

المراجع:

- 1- EHSANI, M. GAO, Y. EMADI. A. "*Modern Electric, Hybrid Electric Fuel Cell Vehicles*". 2nded, Taylor & Francis Group, USA, 2010.
- 2- WONG, J. Y. "*Theory of Ground Vehicles*", John Wiley & Sons, New York, 1978.
- 3- Chan .C. C. Chau, K. T. "*Modern Electric Vehicle Technology*", Oxford University Press, New York, 2001.
- 4- GAO, Y. MAGHBELLI, H. EHSANI, M. FRAZIER, G. KAJS, J. BAYNE, S. "*Investigation of proper motor drive characteristics for military vehicle propulsion,*" Society of Automotive Engineers (SAE) Journal, Paper No. 2003-01-2296, Warrendale, PA, 2003.
- 5- LARMINIE, J. LOWRY. J. "*Electric Vehicle Technology Explained*". John Wiley & Sons Ltd. England, 2003.
- 6- www.siemens.com/international-efficiency