مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (40) العدد (5) 2018
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (40) No. (5) 2018

تحديد استطاعة الكبح لاستعادة القدرة في السيارات الكهربائية

د. عبد الله ساميز*

(تاريخ الإيداع 2 / 7 / 2018. قُبِل للنشر في 21/ 10 / 2018)

ملخّص

يعتبر الكبح باستعادة القدرة أحد أهم المواضيع في المركبات الكهربائية لأنها تساعد على زيادة فترة التشغيل للمركبة من خلال استعادة جزء من الطاقة الميكانيكية خلال الكبح إلى طاقة كهربائية. يهدف هذا البحث إلى دراسة القوى الناتجة خلال الكبح والعزوم المرافقة لها والطاقة الحركية الممكن الاستفادة منها، ومن ثم تطبيق هذه النتائج على نموذج في بيئة الماتلاب لمحاكاة حالات التباطؤ المختلفة (السرعة التي يبدأ عندها الكبح ومعدل التباطؤ)، وكيف ينعكس ذلك على الاستطاعة الطلوبة للكبح عند هذه المعدلات، وهل هي مساوية لاستطاعة المحرك أم أننا نحتاج للكبح التقليدي (الكبح بالاحتكاك) على التوازي مع الكبح باستعادة القدرة.

الكلمات المفتاحية: الكبح باستعادة القدرة، استطاعة الكبح، معدل التباطؤ، الكبح بالاحتكاك

* أستاذ مساعد – قسم هندسة الطاقة الكهربائية – كلية الهمك– جامعة دمشق

مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (40) العدد (5) 2018
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (40) No. (5) 2018

Determining braking power to recover energy in electric vehicle

Dr. Abd Allah Samiz*

(Received 2 / 7 / 2018. Accepted 21 / 10 / 2018)

□ ABSTRACT □

Recovering braking power is one of the most important topics in electric vehicles because it helps to increase the operating time of the vehicle by restoring part of the mechanical energy during braking to electrical energy. The aim of this study is to analyzing the power of the resulting forces during braking, the associated attenuation and the kinetic energy that can be utilized. Therefore, these results are applied to a model in Matlab environment to simulate the various slowdowns (the speed at which the braking starts and the deceleration rate), and how this is reflected on the required braking power and whether motor's power is sufficient to receive all braking energy or do we need traditional braking (friction braking) as well.

Keywords: Recovering braking power, braking power, deceleration rate, and friction braking

* **Assistant Professor, Department of Electrical Power Engineering, Al-Hamak College, Damascus University**

مقدمة:

تعتبر إمكانية استعادة طاقة الكبح أحد أهم المزايا التي تتمتع بها السيارات الكهربائية أو السيارات الهجينة، حيث يمكن التحكم بالمحركات الكهربائية بحيث تعمل كمولدات لتحويل الطاقة الحركية (الطاقة الكامنة في كتلة المركبة المتحركة) إلى طاقة كهربائية يتم تخزينها وإعادة استخدامها مرة أخرى، فمثلاً في المحركات التزامنية ذات المغانط الدائمة يمكن عكس مبدأ التحريك (تقديم طاقة كهربائية وتحويلها لطاقة كهرطيسية تقوم بدورها بتوليد قوى محركة ميكانيكية تدور المحرك) وتحويله للتوليد عن طريق الاستفادة من الطاقة الميكانيكية وتحويلها إلى قوة محركة كهربائية عن طريق المغانط المتحركة والتي تظهر على شكل توترات على الملفات بوصلها بأحمال فيمر تيار (في حالة المركبات الكهربائية إعادة الشحن)، ونفس المبدأ ينطبق على محركات التيار المستمر. حيث من المعروف أن هذه الأنواع من المحركات هي الأكثر استخداماً في المركبات الكهربائية.

ويعتبر أداء الكبح أحد أهم العوامل الأساسية لأمان المركبة، فلتحقيق التصميم الناجح للكبح لا بد من تحقيق التوازن بين تخفيض السرعة بشكل كبير وبين الحفاظ على ثبات المركبة، حيث يتطلب إيقاف السيارة بسرعة كبيرة تطبيق عزم كبير على العجلات، هذا العزم أكبر بكثير من العزم الذي ينتجه المحرك الكهربائي عند العمل بالحالة الطبيعية، لذلك لا بد من استخدام الكبح بالاحتكاك التقليدي Friction Brake على التوازي مع الكبح باستعادة القدرة لضمان إيقاف المركبة بأسرع ما يمكن مع الحفاظ على التوازن، وبالتالي يطلب تصميم نظام الكبح لاسترجاع أكبر قدرة من الطاقة مع الحفاظ على التوازن.

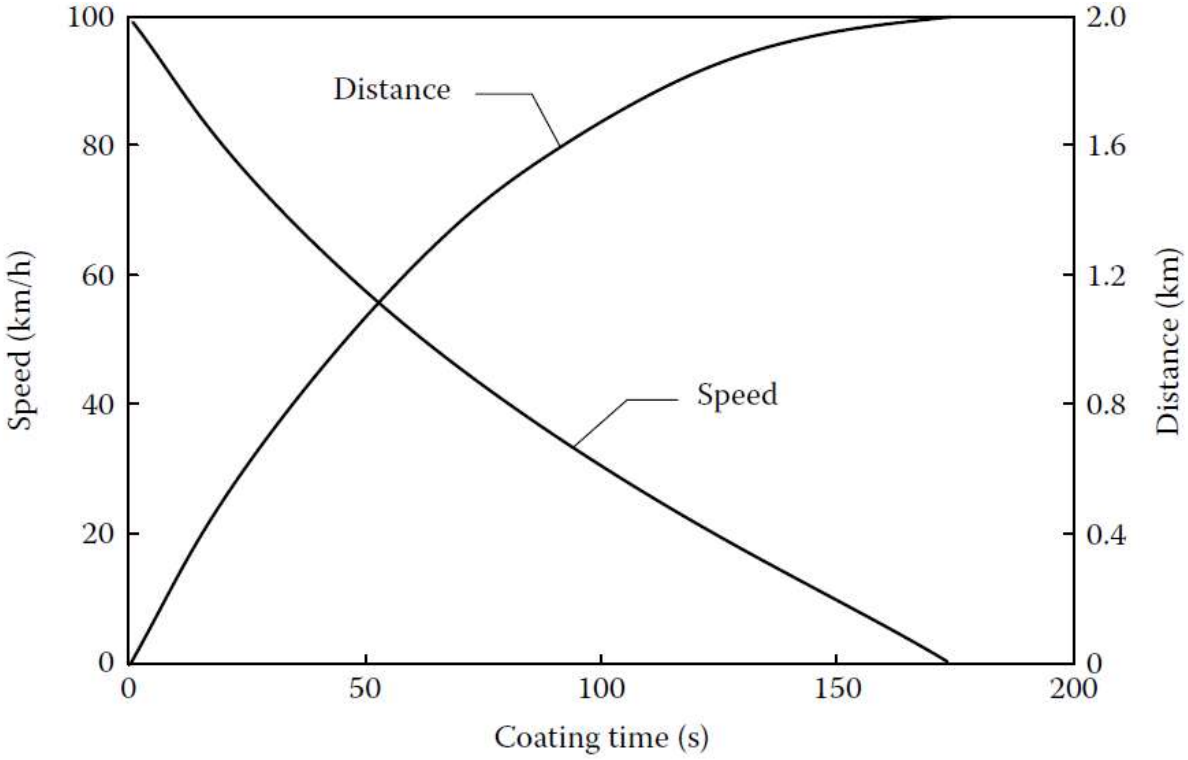
الطاقة المستهلكة في الكبح:

خلال دورة عمل المركبات هناك طاقة كبيرة تضيع خلال الكبح، فمثلاً لكبح مركبة ذات وزن 1500 كغ من سرعة 100 كم/سا إلى الصفر تكون كمية الطاقة الحركية المتوفرة وفق العلاقة:

$$E = \frac{1}{2} * M * V^2 \quad (1)$$

حيث: E الطاقة الحركية جول، M كتلة المركبة كغ، V السرعة الخطية للمركبة م/ثا

أي تكون الطاقة الموافقة للمركبة عند هذه السرعة 0.16 كيلو واط ساعي، فبفرض نريد الاعتماد على الكبح بواسطة قوى المقاومة على المركبة (الجر الآيروديناميكي ومقاومة احتكاك العجلات) والذي يعرف Coasting Brake، عندئذٍ نحتاج لقطع مسافة 2 كم حتى تتوقف المركبة [1] كما في الشكل(1):



الشكل(1): علاقة المسافة المقطوعة خلال الكبح الحر مع السرعة

لكن كما هو معروف دورة القيادة ضمن المدينة تتطلب حالات سير وتوقف متكررة أي الكبح متكرر، فلاسترداد هذه القدرة لا بد من فهم أداء الكبح وعلاقته مع السرعة ومعدل التباطؤ. فعند القيادة على طريق مستو استطاعة الجر على العجلات تعطى بالعلاقة [3] [1]:

$$P_d = \frac{V}{100} * \left(M.g.f_r + \frac{1}{2}.\rho.A.C_D.V^2 + M.\delta.\frac{dV}{dt}\right) \quad [kW] \qquad (2)$$

حيث:

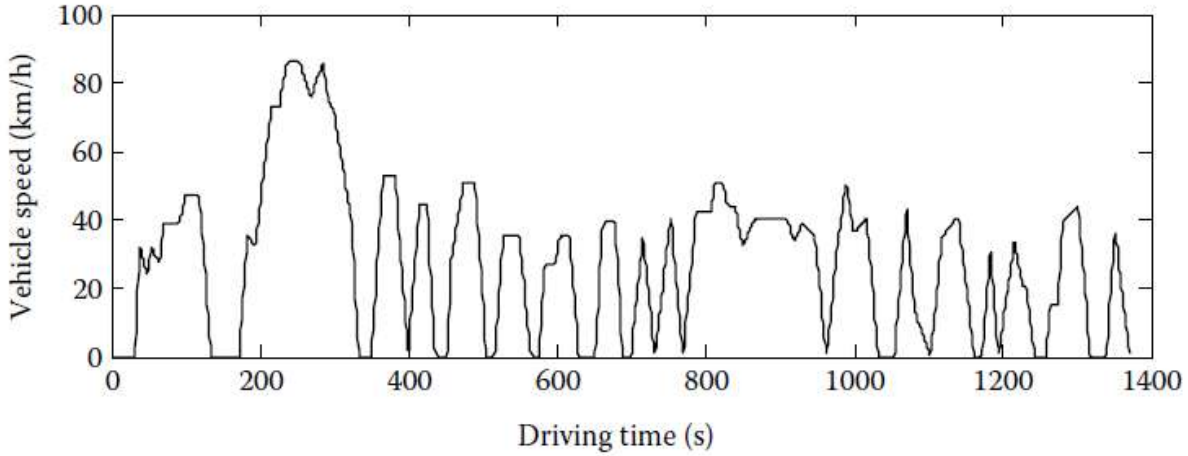
M كتلة المركبة كغ ، g تسارع الجاذبية م/ثا^2

f_r معامل مقاومة الدوران ، C_D معامل الجر

V سرعة المركبة م/ثا ، δ عزم العطالة الدوارة

A المساحة الأمامية للمركبة م^2 ، ρ كثافة الهواء كغ/م^3

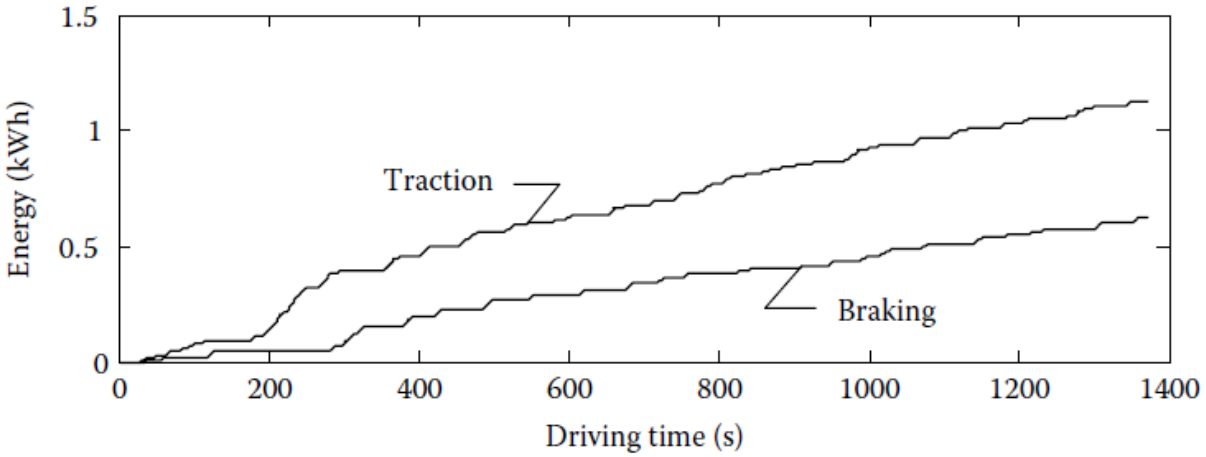
فعندما $P_d > 0$ تأخذ العجلات الاستطاعة من المحرك (حالة التحريك)، أما عندما $P_d < 0$ تكون المركبة في حالة كبح كون التسارع أصبح سالباً (تباطؤ) وقيمة مركبة الاستطاعة الموافقة للتباطؤ تتغلب على الحدين الأول والثاني الذين يمثلان مقاومة الحركة. فبمكاملة العلاقة (2) على دورة قيادة FTP75 كما في الشكل(2) (حيث تمثل حالات تسارع وتباطؤ وتوقف يتم من خلالها تجريب واختبار أداء المركبات الكهربائية لاعتمادها أم لا، ودورة FTP75 معتمدة في الولايات المتحدة، وهناك دورات قيادة مختلفة)، وباستخدام مركبة لها المواصفات المبينة في الجدول (1)، نجد قيمة طاقة الجر كاملة وطاقة الكبح على كامل الدورة كما في الشكل(3):



الشكل(2): دورة قيادة ضمن المدينة نوع FTP75

الجدول(1): مواصفات المركبة المدروسة

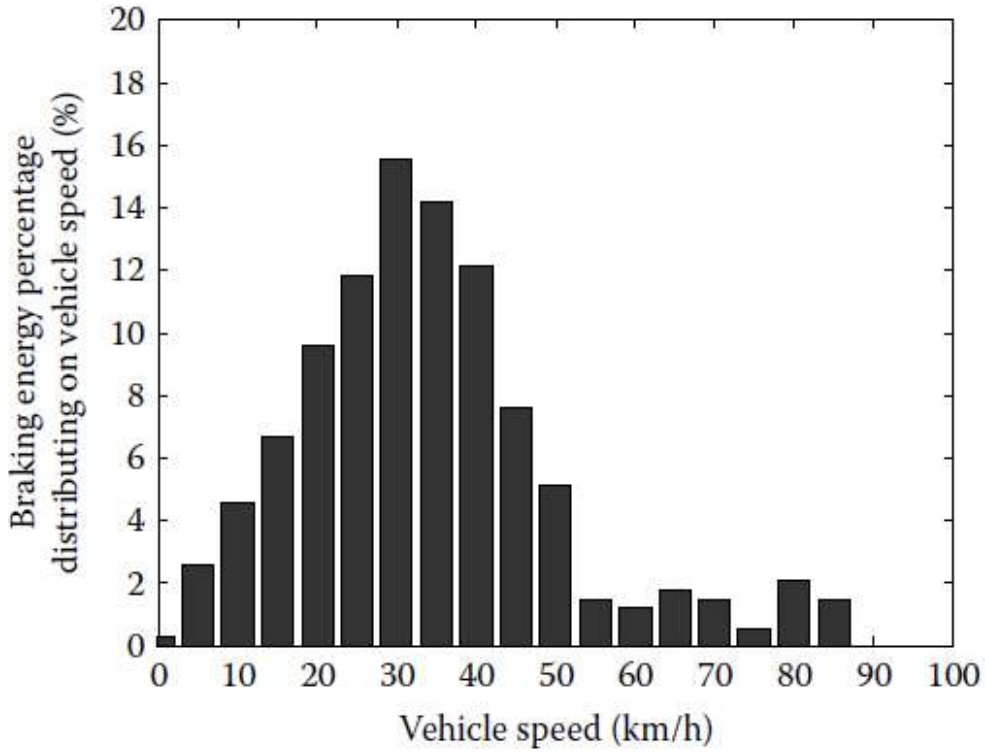
Item	Symbol	Unit	Value
Vehicle mass	M	kg	1500 (fully, loaded), 1250 (unloaded)
Rolling resist. coefficient	f_r		0.01
Aerodynamic drag coefficient	C_D		0.3
Front area	A	m^2	2.2
Wheel base	L	m	2.7
Distance from gravity center to front wheel center	L_a	m	1.134 (fully loaded), 0.95 (unloaded)
Gravity center height	h_g	m	0.6 (fully loaded), 0.5 (unloaded)



الشكل(3): طاقة كلاً من الكبح والدفع خلال كامل الدورة

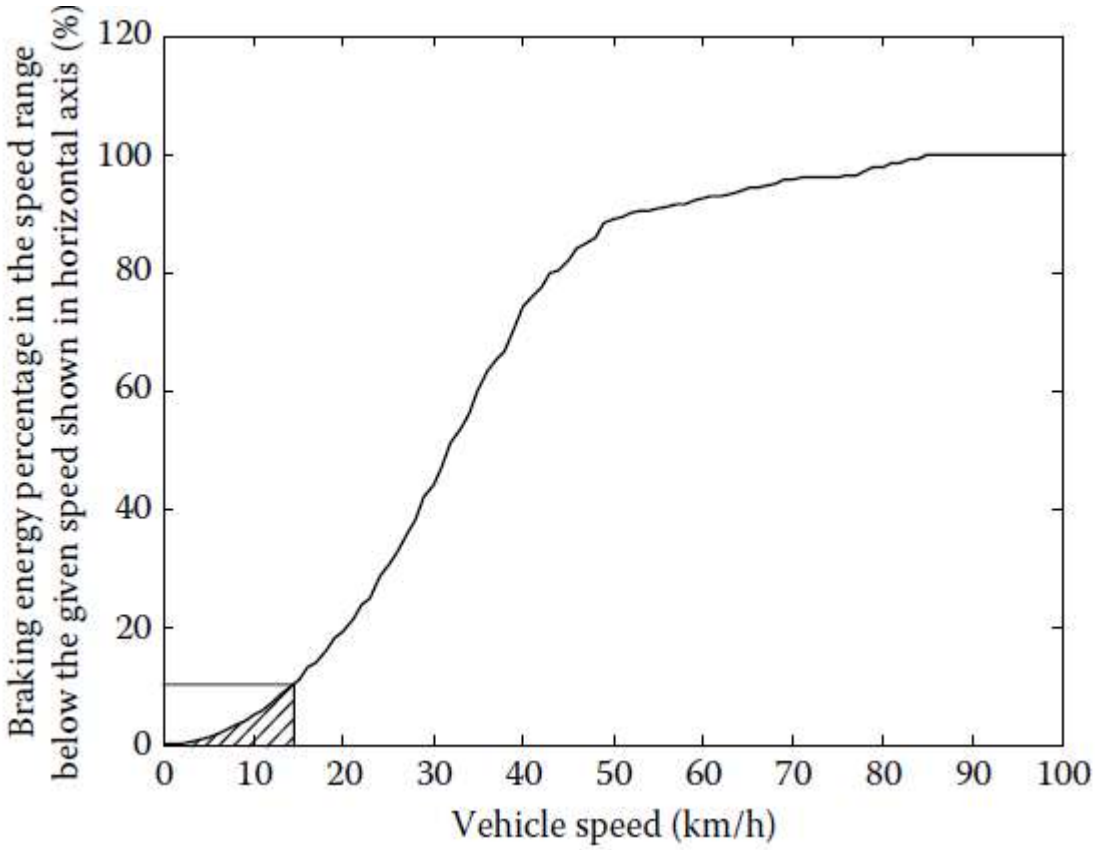
3- علاقة طاقة الكبح بسرعة الحركة:

يعتبر معرفة طاقة الكبح عند كل سرعة مفيداً عند التصميم والتحكم، فيبين الشكل(4) طاقة الكبح التي من الممكن استعادتها كنسبة مئوية من طاقة الدفع وذلك عند الكبح من سرعات مختلفة ولأجل نفس المركبة ونفس دورة القيادة وهو مأخوذ من المرجع [6] [3]:



الشكل(4): نسبة الكبح عند السرعات المختلفة[3]

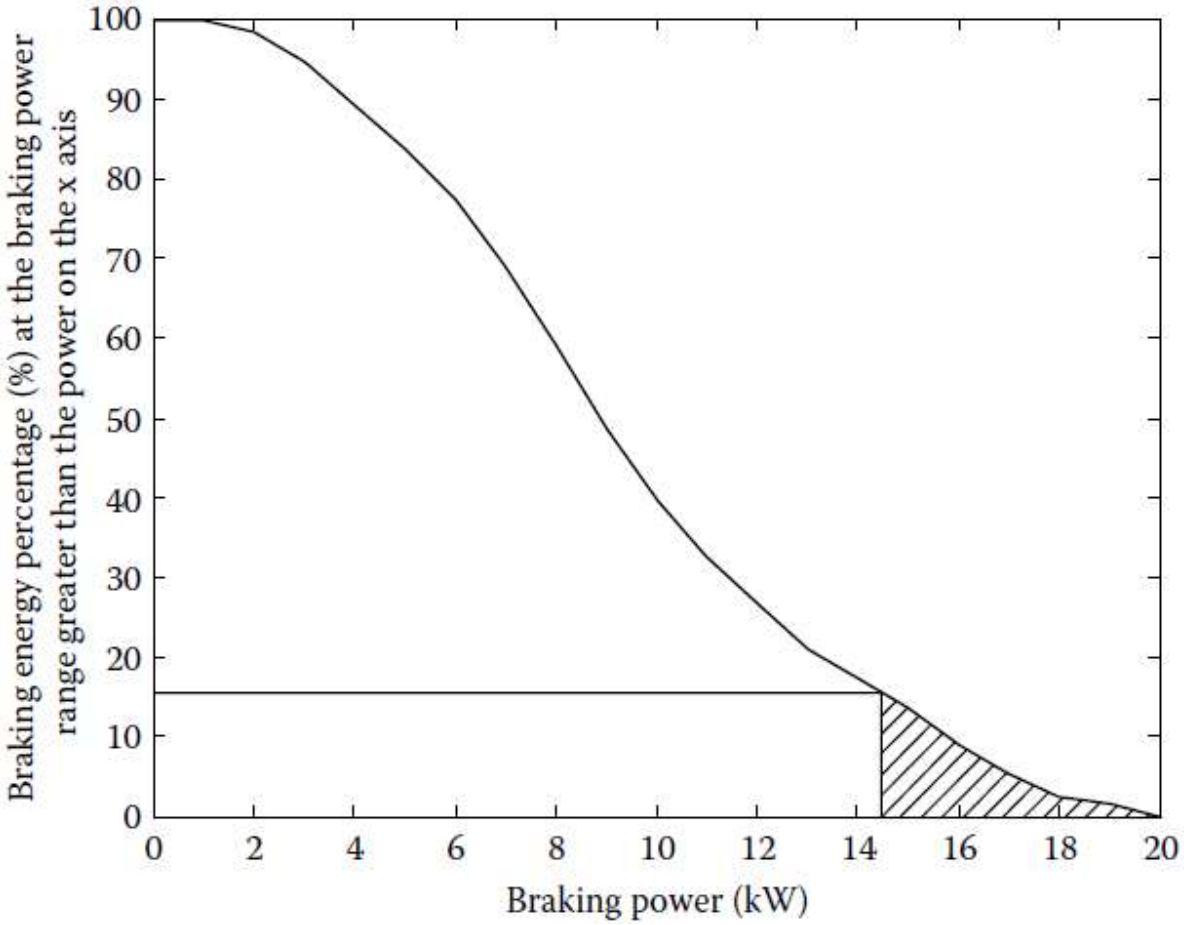
بينما الشكل(5) يوضح هذه العلاقة بشكل أدق[3] [2]، حيث نلاحظ أنه عند سرعات أقل من 15 كم/سا، فإن 10% فقط من الطاقة تذهب عند الكبح، وبالتالي لا نسعى للعمل عند مثل هذه القيم وخصوصاً كون الكبح بإعادة القدرة صعباً لصغر القوة المحركة الكهربائية المتولدة في المحرك عند مثل هذه السرعات.



الشكل(5): قيمة نسبة طاقة الكبح كتابع لسرعة المركبة

4- علاقة استطاعة الكبح مع طاقة الكبح:

تعتبر هذه العلاقة مهمة جداً حيث من خلالها يتم تحديد مقدار الطاقة التي يمكن أن يسترجعها المحرك الكهربائي حسب استطاعته، فمثلاً بأخذ استطاعة الكبح للمركبة السابقة عند نفس دورة القيادة كان منحني استطاعة الكبح وطاقة الكبح كما في الشكل(6):



الشكل(6): علاقة طاقة الكبح باستطاعة الكبح

حيث نجد أن استطاعة الكبح تتجاوز 14.4 كيلو واط تقريباً فقط في 15% من الدورة، أي عند اختيار محرك باستطاعة 15 كيلو واط نضمن استرداد 85% من طاقة الكبح.

5- أداء الكبح:

يعتبر أداء الكبح أحد أهم المعاملات التي تحدد نسبة الأمان في المركبة حيث يستهلك الكبح طاقة كبيرة يتم تحويل جزء منها في المركبات الكهربائية إلى طاقة كهربائية. لكن تبقى هناك فكرة كبح المركبة بأسرع وقت ممكن، أي لا يمكن الاستغناء عن فكرة الكبح الميكانيكي (الكبح بالاحتكاك) فلا بد من استخدام الكبح الهجين Hybrid Braking والذي يعتمد في التصميم والتحكم على:

- تأمين قوة كبح كافية لإنقاص سرعة المركبة
- توضع قوى الكبح بشكل مناسب على العجلات الأربعة لضمان استقرار المركبة عند الكبح
- استعادة أكبر قدر ممكن من طاقة الكبح

5-1- قوة الكبح:

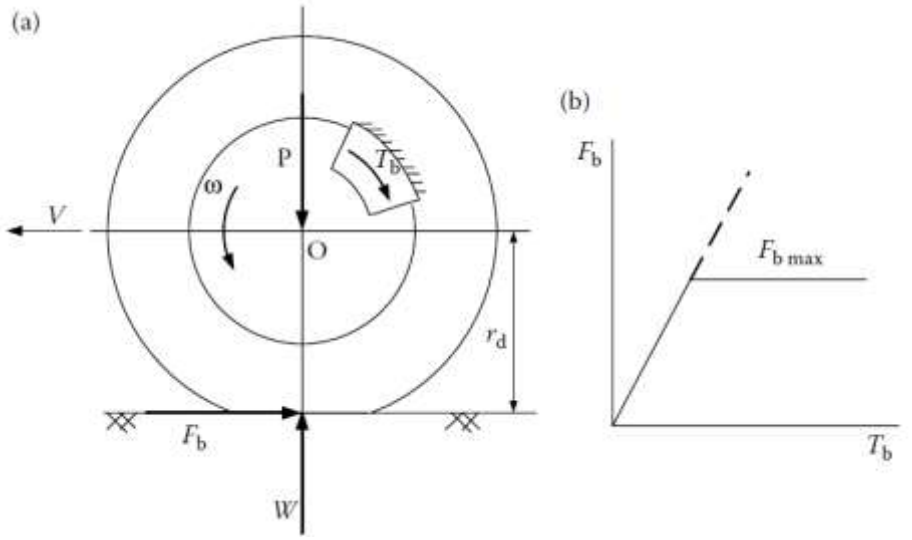
مهمة الكبح تخفيض سرعة المركبة مع الحفاظ على اتجاه الحركة مستقراً ومتحكم به، حيث يبين الشكل(7-a) العجلات أثناء الكبح حيث يتولد عزم كبح T_b نيوتن .متر يظهر على شكل قوة كبح F_b النيوتن في منطقة الاتصال بين العجلات والأرض عند نصف القطر الفعال r_d بالمتر والتي تعطى بالعلاقة:[1]

$$F_b = \frac{T_b}{r_d} \qquad (3)$$

لكن عندما تصل قوة الكبح إلى القيمة العظمى التي يمكن أن تتحملها منطقة الاتصال لن تتجاوزها قوة الكبح مهما زاد عزم الكبح كما في الشكل (7-b)، حيث يعبر عن هذه القوة بالعلاقة:

$$F_{b\,max} = \mu . W \qquad (4)$$

حيث μ معامل الالتصاق وهو تابع للانزلاق $\omega = 0$ يكون الانزلاق 100% والعجلة مقفلة تماماً Completely Locked وبالتالي تصبح المركبة تنزلق وتتحرك طولياً لكن العجلات لا تدور. و W القوة الناظمة على الأرض.



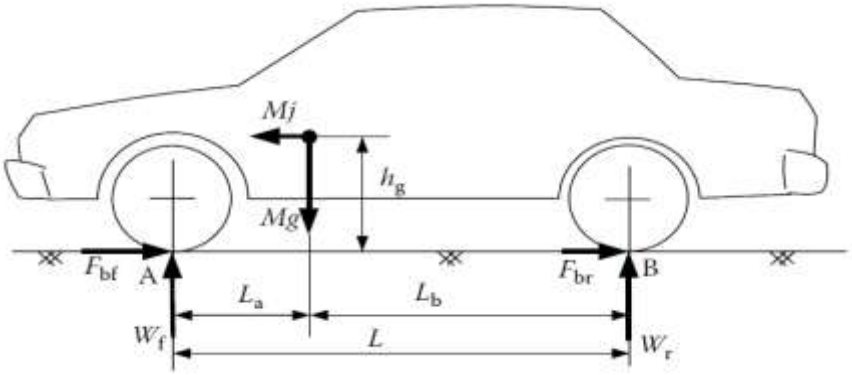
الشكل(7): عزم الكبح وقوة الكبح[1]

5-2- توزيع الكبح على المحاور:

يبين الشكل (8) القوى العاملة على المحاور خلال الكبح على طريق مستوي حيث تم إهمال مقاومة الدوران والجر الآيروديناميكي لصغرها مقارنة مع قوة الكبح حيث J هو التباطؤ خلال الكبح ويعطى بالعلاقة [4]:

$$j = \frac{F_{bf}+F_{br}}{M} \qquad (5)$$

حيث F_{bf}، F_{br} قوى الكبح على المحورين الخلفي والأمامي.



الشكل (8): القوى العاملة على المركبة على طريق مستوي

كما ذكرنا قوة الكبح لها علاقة بمعامل الالتصاق ويتناسب طرداً مع الحمل على العجلات، بالتالي الحمل على المحاور مع التباطؤ يعطى بالعلاقات التالية [5]:

$$W_f = \frac{M.g}{L}\left(L_b + h_g.\frac{j}{g}\right) \qquad (6)$$

$$W_r = \frac{M.g}{L}\left(L_a - h_g.\frac{j}{g}\right) \qquad (7)$$

وبالتالي قوى الكبح [6] [5]:

$$\frac{F_{bf}}{F_{br}} = \frac{W_f}{W_r} = \frac{L_b + h_g.j/g}{L_a - h_g.j/g} \qquad (8)$$

لكن لابد من تحديد قوة الكبح الأعظمية التي تتحملها العجلات لتجنب حالة القفل والتي يقابلها أعظم تباطؤ يمكن الحصول عليه كما في المعادلة [5] [3]:

$$|j_{max}|_\mu = \frac{F_{bf\,max} + F_{br\,max}}{M} = \frac{(W_f + W_r).\mu}{M} = g.\mu \qquad (9)$$

غالباً ما يقوم نظام الكبح بتوليد قوى كبح مختلفة لكن تبقى النسبة بينها ثابتة ويرمز لها β وتعطى بالعلاقة [3] [5]:

$$\beta = \frac{F_{bf}}{F_b} \qquad (10)$$

حيث $F_b = F_{bf} + F_{br}$ قوة الكبح الكلية، وبالتالي:

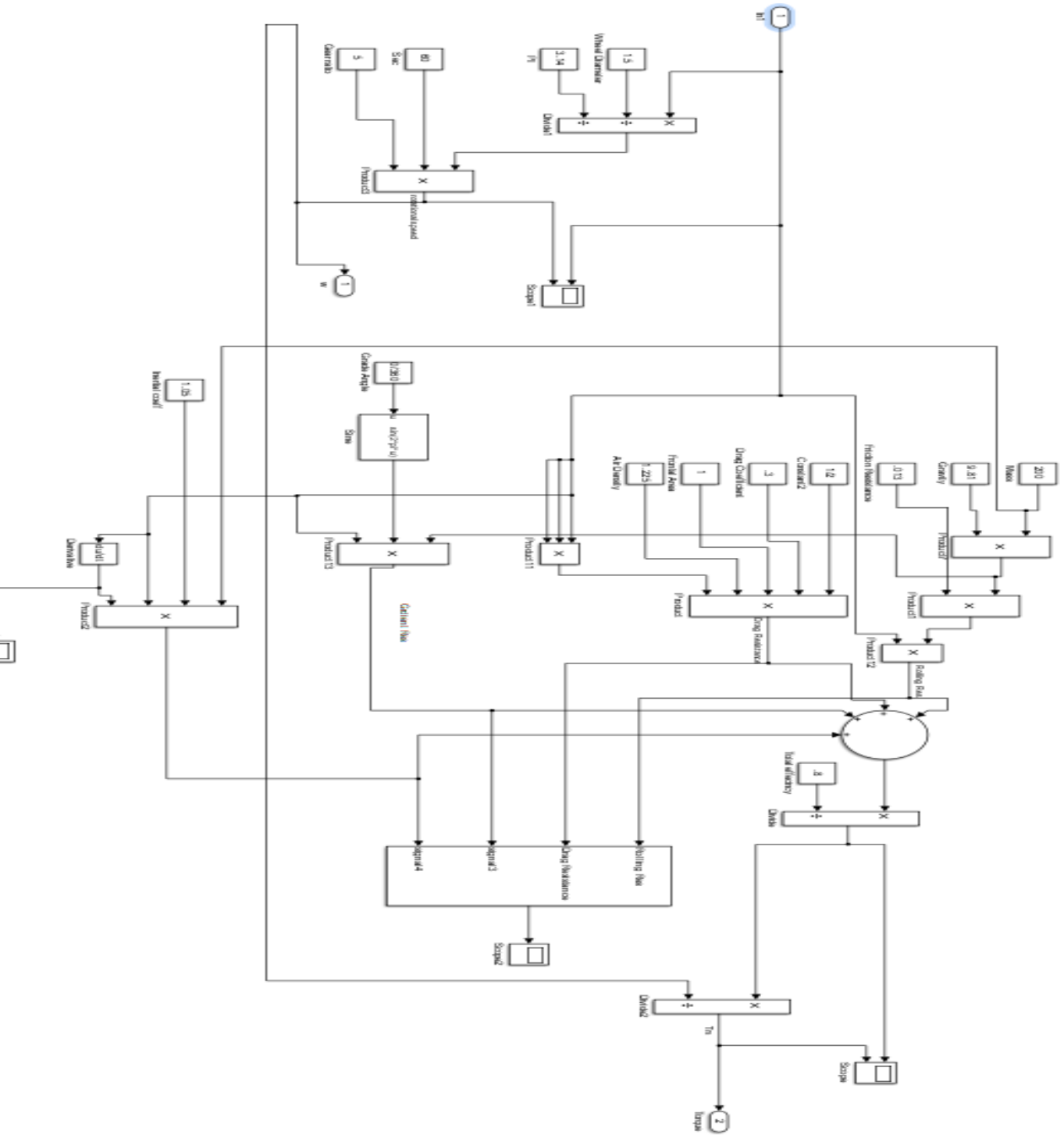
$$F_{bf} = F_b.\beta \qquad (11)$$

$$F_{br} = F_b.(1 - \beta) \qquad (12)$$

وهذه النسبة تعتمد على تصميم نظام الكبح مثل قطر العجلة.

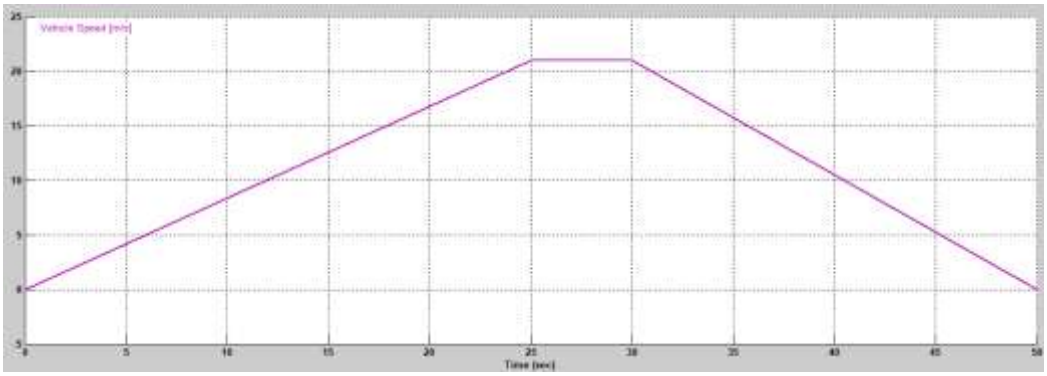
6- النمذجة والمحاكاة:

قمنا بأخذ العلاقات الناظمة لعمل المركبات الكهربائية بشكل عام والقوى المؤثرة بها ونمذجتها في بيئة الماتلاب وفق الشكل(9)، والذي يأخذ السرعة المطلوبة كدخل له يتم من خلالها حساب مركبات القوى المطبقة على المركبة وبجمع القوى الثلاثة مع بعضها (قوة الاحتكاك، الجر الأيروديناميكي، التسارع)، ومن ثم تحويلها لعزوم واستطاعات، فيكون الخرج الاستطاعة الكهربائية والعزم المطلوبين من المحرك:



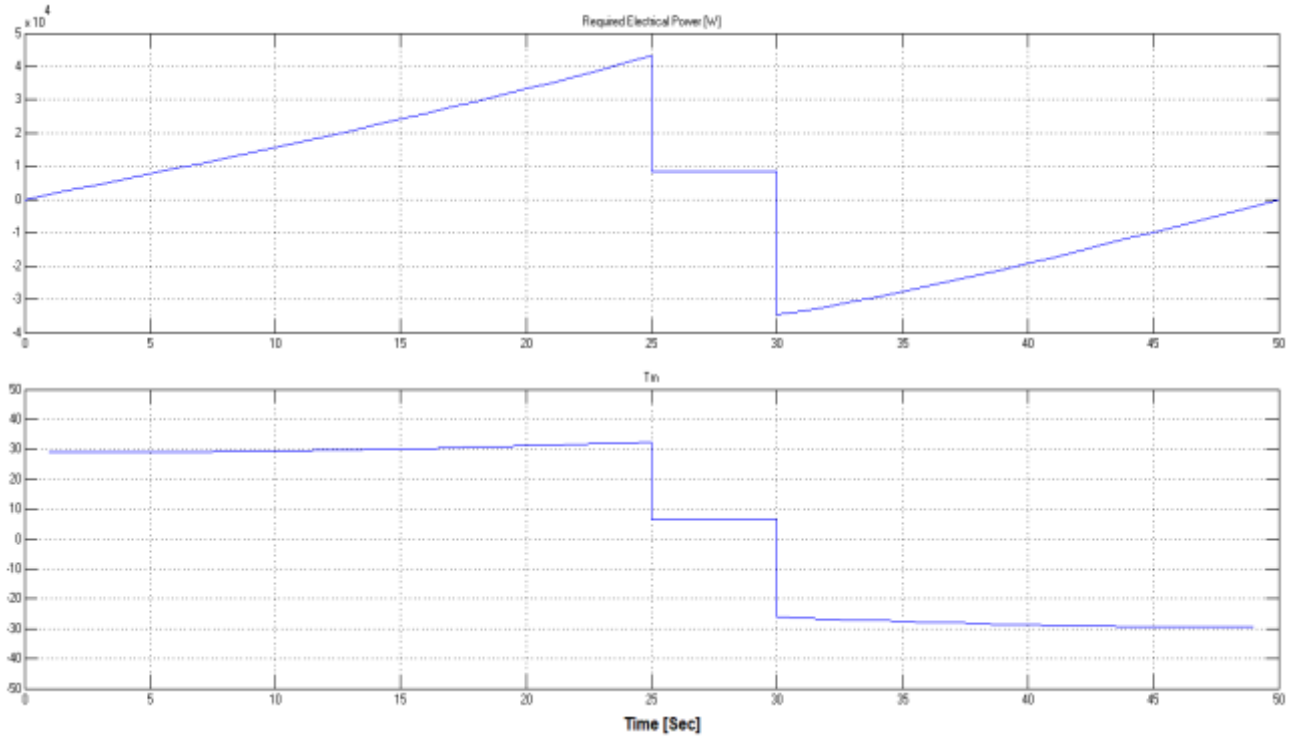
الشكل(9): نمذجة القوى المؤثرة على المركبة

وبتطبيق إشارة سرعة كما في الشكل(10)، والتي تفرض تسارع المركبة خلال 25 ثانية إلى سرعة 70 كم/سا، ثم ثبات السرعة لمدة 5 ثواني ثم تباطؤ خلال 20 ثانية إلى الصفر:



الشكل(10): منحني سرعة المركبة

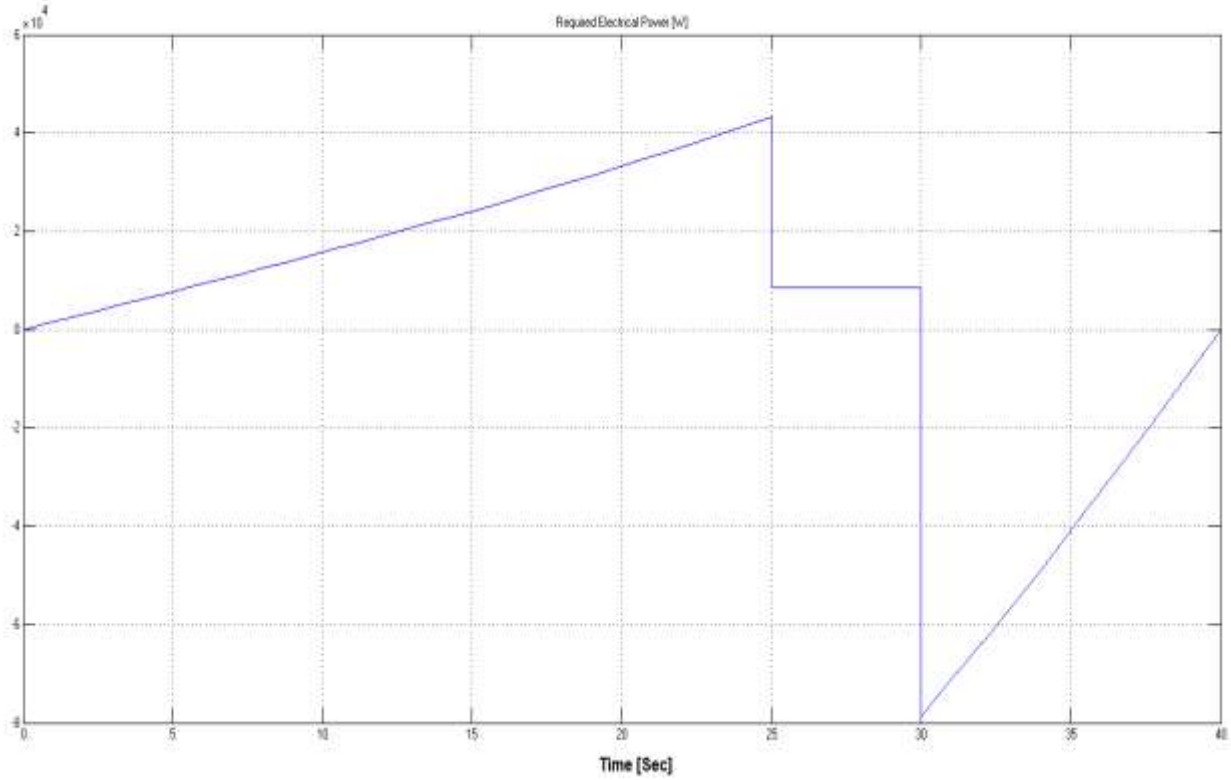
حيث كانت قيمة الاستطاعة الكهربائية المطلوبة والعزم كما في الشكل(11):



الشكل(11): الاستطاعة الكهربائية والعزم المطلوبين من المحرك الكهربائي

حيث نلاحظ عند التسارع ونظراً لوجود مركبة التسارع مع القوى المطلوب تأمينها من محرك الجر، تصل الاستطاعة الكهربائية لحدود 42 كيلو واط، ثم تعود للتناقص عند استقرار السرعة حيث تثبت عند القيمة 10 كيلو واط و التي تكفي للتغلب على المقاومات، بينما عند التباطؤ ونظراً لكون السرعة كبيرة نلاحظ أن التسارع أصبح سالباً ومعدل التباطؤ والذي يساوي 20/21 أي ما يعادل 1 م/ثا^2 كان أكبر من قوى المقاومة لذلك شكل عزماً سالباً على المحرك (إمكانية استعادة القدرة)، حيث نلاحظ أن استطاعة الكبح كانت بحدود 35 كيلو واط أي استطاعة المحرك كافية لتأمين الكبح باستعادة القدرة.

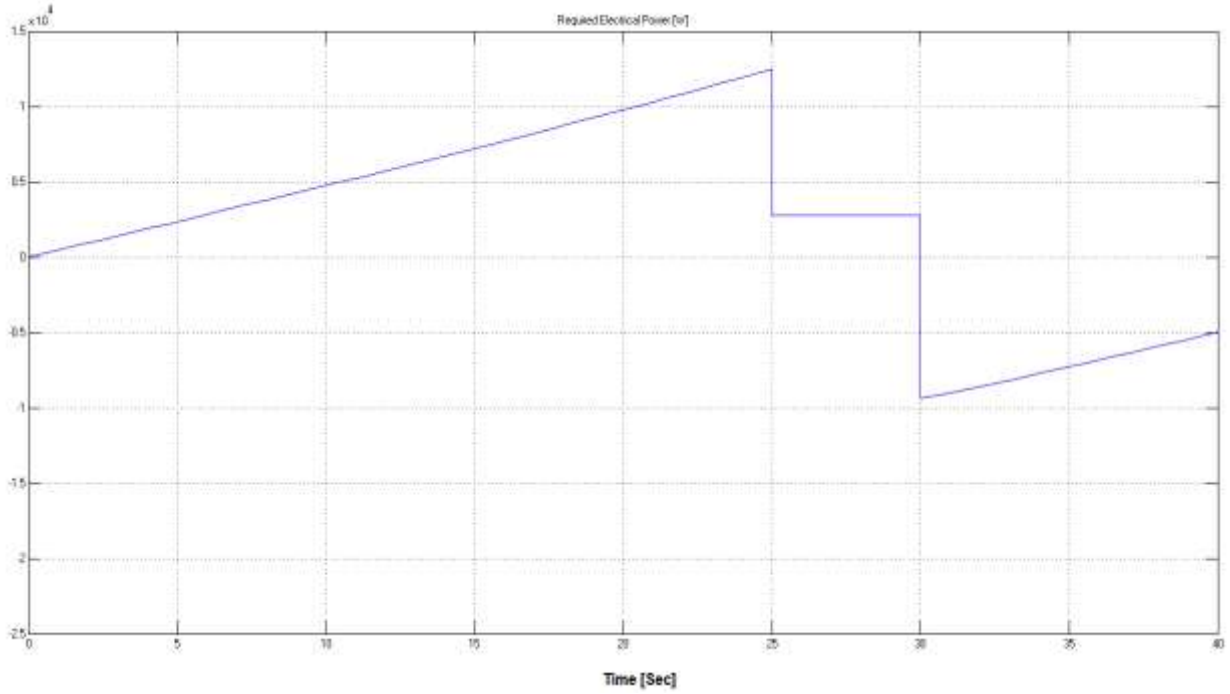
بينما إذا فرضنا التباطؤ كان خلال 10 ثانية أي ما يعادل 2.1 م/ثا^2، عندها كان منحني الاستطاعة كما في الشكل(12):



الشكل(12): الاستطاعة المطلوبة عند زيادة معدل التباطؤ

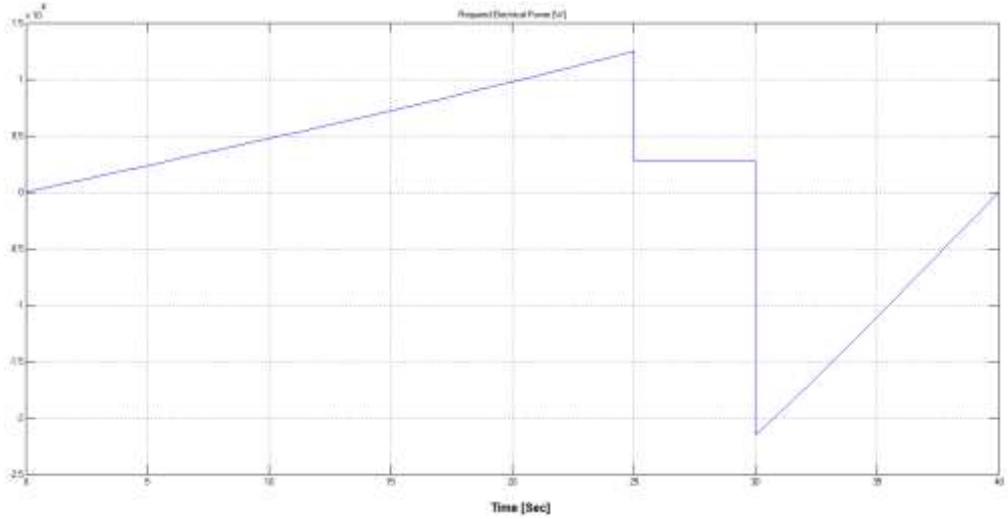
حيث نلاحظ أن استطاعة الجر بقيت كما هي بينما الاستطاعة الناتجة عن الكبح أصبحت بحدود 80 كيلو واط، أي أن المحرك لن يكون قادراً على استعادة القدرة عند الكبح، أي لا بد من تطبيق الكبح الميكانيكي حتى تصل الاستطاعة إلى قيمة استطاعة المحرك عندها يمكن أن يتم الكبح باستعادة القدرة.

أما بأخذ محدد السرعة التي يبدأ عندها الكبح بعين الاعتبار، أي بفرض تخفيض السرعة التي تستقر عندها المركبة مثلاً إلى 40 كم/سا كانت النتائج كما الشكل(13):



الشكل(13): الاستطاعة عند تباطؤ خلال 20 ثانية من سرعة 40كم/سا

حيث نلاحظ أن انخفاض السرعة المطلوب الوصول إليها أثر على استطاعة الجر حيث أصبحت الاستطاعة المطلوبة تساوي بحدود 12500 واط، بينما استطاعة الكبح لم تتجاوز 10000 واط، أي أصبح بإمكاننا تخفيض استطاعة المحرك الكهربائي إلى الربع تقريباً، أما بانقاص زمن التباطؤ إلى 10 ثواني فينتج لدينا الشكل(14):



الشكل(14): التباطؤ خلال 10 ثواني من سرعة 40كم/سا

حيث نلاحظ أن استطاعة الكبح تجاوزت 20 كيلو واط، أي لا بد من إدخال الكبح بالاحتكاك خلال المجال الذي تكون فيه استطاعة الكبح أكبر من استطاعة المحرك.

الاستنتاجات والتوصيات:

- تم الحديث عن الكبح بشكل عام والقوى المؤثرة على المركبات خلال الحركة، وذلك لتحديد استطاعة المحرك المطلوبة عند كل حالة عمل.
- تم تحديد البارامترات التي تحدد إمكانية الكبح باستعادة القدرة بناءً على المعادلات التي توصف القوى والعزوم التي تخضع لها المركبة أثناء الكبح.
- تم وضع نموذج للمركبة الكهربائية في بيئة الماتلاب لتحديد استطاعة الجر واستطاعة الكبح.
- تم من خلال النموذج تحديد معدل التباطؤ المسموح به وقيمة السرعة المسموح بدء التباطؤ عندها، ليصار إلى تحديد إمكانية إدخال الكبح باستعادة القدرة من جهة وتحديد المجال الذي نحتاج فيه إلى إدخال الكبح التقليدي (الكبح بالاحتكاك).
- يمكن اتمام الدراسة بتطبيق نموذج فيزيائي يحاكي نموذج الماتلاب لمقارنة النتائج.
- يمكن إجراء دراسة اقتصادية من خلال تحديد المسافة الإضافية المقطوعة عند استخدام الكبح باستعادة القدرة والوفر الحاصل في الوقود في حال استخدامه في المركبات الهجينة.

المراجع:

1-EHSANI, M. GAO, Y. EMADI. A."*Modern Electrical, Hybrid Electronic Fuel cell Vehicles*".2nd ed, 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 electrical 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 vrhicle propulsion*", Society of Automotive Engineers (SAE) JOURNAL, Paper N0.2003-01-2296, Warrendale, PA,2003.

5-LARMINIE, J. LOWRY. J."*Electrical Vehicle Technology Explained*". John Wiely & Sons Ltd. England, 2003.

6- W.Saeed, A.Sandouk, and G.Warkozek. (2018). "*Real Time Control of (Fuel Cells-Converters) System for Electric Vehicle Traction Motor*". PhD thesis, Damascus university.

7-www.siemens.com/international-efficincy