بسمه تعالی

دانشکده مکانیک

تئوری حرکت خودرو

مرجع:

"Fundamentals of Vehicle Dynamics"

Written by Thomas D.Gillespie

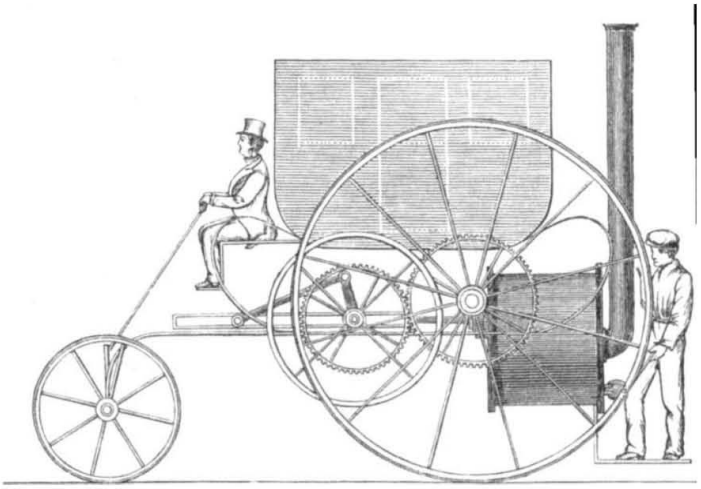
کلیات

عصر ظهور خودروهای موتوری

پیدایش خودروهای موتوری به سال ۱۷۶۹ باز میگردد (۲۴۴ سال قبل) که در آن زمان یک مهندس نظامی فرانسوی، نیکلاس جوزف کاگنات یک خودروی سه چرخ را با نیروی محرکه بخار به منظور کشیدن قطعات توپ ساخت.

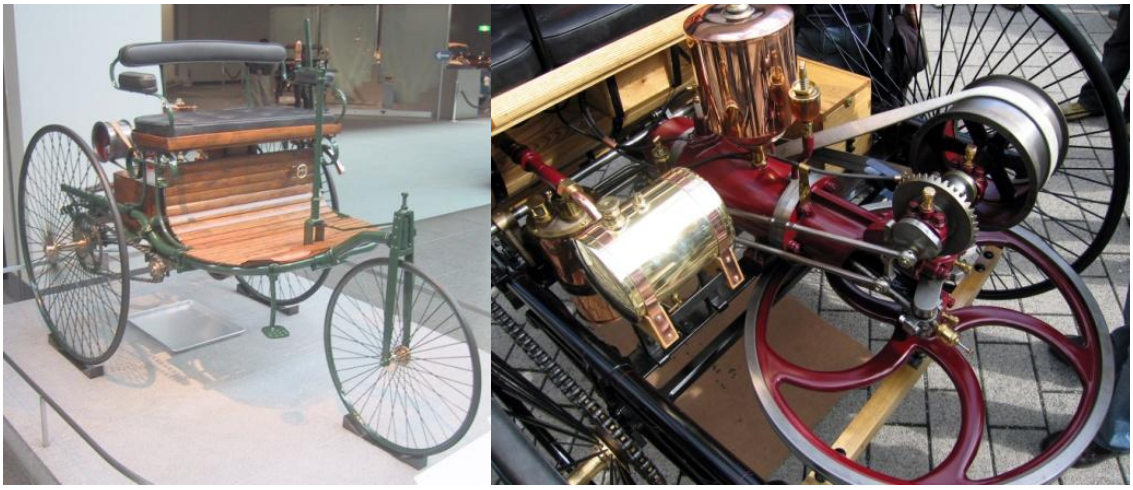
شکل ۱: اولین وسیله نقلیه موتوری ساخته شده توسط جوزف کاگنات

به دنبال آن یک خودرو با نیروی بخار در سال ۱۷۸۴ توسط یک مهندس اسکاتلندی به نام جیمز وات ساخته شد که کارآیی چندانی نداشت. در سال ۱۸۰۲ یک فرد انگلیسی به نام ریچارد ترویتیک یک کالسکه با نیروی بخار ساخت که از کورن وال تا لندن برده شد، ساخت این نوع کالسکهها تا سال ۱۸۶۵در انگلیس ادامه داشت.



شکل ۲. کالسکه بخار ساخته شده توسط ریچارد ترویتیک

اولین اتومبیلهایی که با موتورهای بنزینی کار میکردند، در سال ۱۸۸۶(۱۲۷ سال قبل) به بازار عرضه شدند که ظهور آنها عمدتا " به آقایان کارل بنز و گاتلیب دایملر که بطور مسقل کار میکردند نسبت داده شده است.

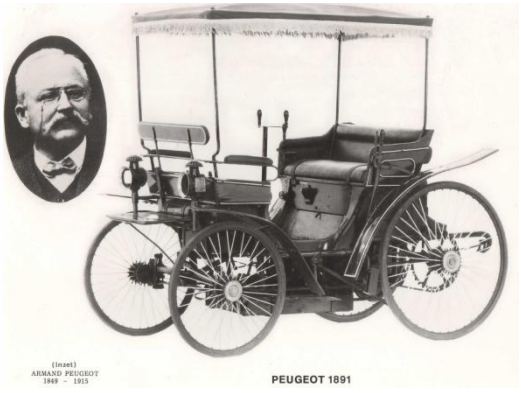


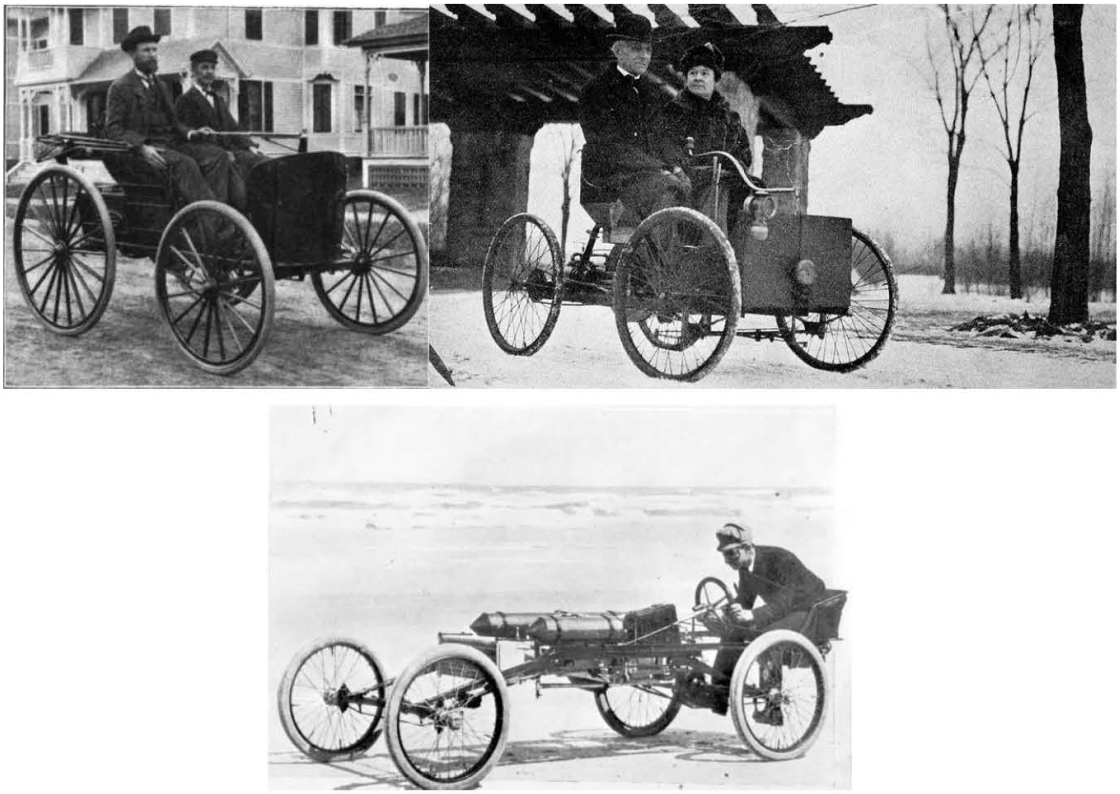
شکل ۳. اولین اتومبیل با موتور بنزینی ساخته شده توسط کارل بنز

شکل ۴. اولین موتور بنزینی ساخته شده توسط گاتلیب دایملر

در طی دهه بعدی، وسایل نقلیه موتوری توسط افراد دیگری طراحی و ساخته شدند که عبات بودند از:

رنه پانهارد و امیل لواسور، آرماند پژو، فرانک و چارلز دیوری، هنری فورد و رنسمالدز.





شکل ۵. به ترتیب از بالا تا پائین (از راست به چپ: پانهارد و امیل لواسور، آرماند پژو، فرانک و چارلز دیوری، هنری فورد و رنسمالدز)

هم اکنون صنعت خودرو تقریبا اولین قرن خود را پشت سر میگذارد. مهندسین به پیشرفتهای قابل ملاحظهای در تکنولوژیهایی بکار گرفته شده در اتومبیلها دست یافته اند. دینامیک خودرو و یا به عبارتی تئوری حرکت خودرو بیش از هر زمان دیگر، نقش مهمی را در طراحی و پیشرفت وسائط نقلیه ایفا می کند.

فصل اول

دینامیک خودرو

روش اساسی در مدل سازی

موضوع دینامیک خودرو با حرکت وسائط نقلیه مانند اتومبیلهای سواری، اتوبوسها و خودروهای ویژه بر سطح جادهها مرتبط است. از جمله این موضوعات می توان به شتاب ترمزگیری، راندن و دور زدن اشاره کرد.

رفتار دینامیکی توسط نیروهای اعمال شده (از چرخها، جاذبه و آیرودینامیک) بر روی وسیله نقلیه تعریف میشود. وسیله نقلیه و اجزای آن مورد مطالعه قرار گرفته تا مشخص شود که هر یک از منابع فوق در یک مانور بخصوص وشرایط ویژه چه نیروهایی تولید میکنند و یا چگونه خودرو به این نیروها پاسخ می دهد. بدین منظور ضروری است که روش دقیق و مناسبی برای شبیهسازی سیستمها و اصول مورد استفاده در تشریح حرکتایجاد شود.

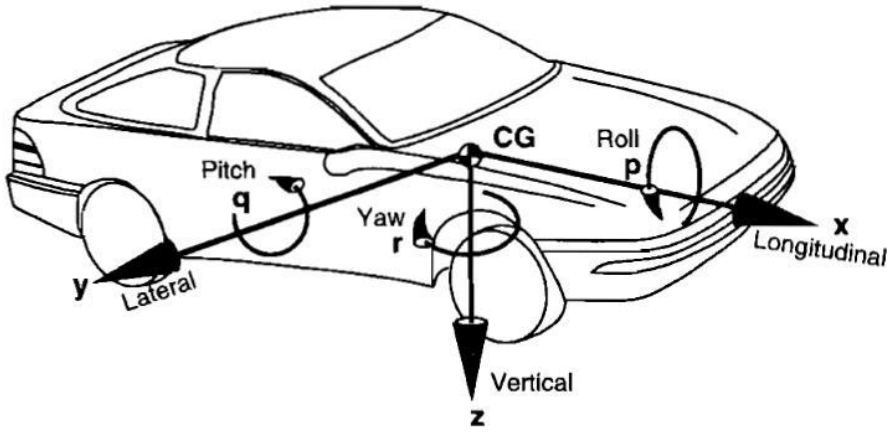
جرم متمرکز

یک وسیله نقلیه موتوری از اجزای بسیاری که در داخل پوشش خارجی خودرو پراکنده شدهاند، تشکیل شده است.در تحلیل اولیه از خودرو میتوان گفت که کلیه اجزای آن با هم حرکت می کنند.

به عنوان مثال، هنگام ترمز کردن کلیه اجزای خودرو به صورت واحد عمل کرده، سرعت را کاهش می دهند. بنابراین میتوان خودرو را به صورتیک جرم متمرکز که در مرکز ثقل خود با جرم مناسب و ویژگیهای اینرسی قرار دارد، تعریف کرد.

برای تحلیل شتاب، ترمز کردن و چرخیدن یک مرکز جرم کافی است. برای تحلیل رانش این مسئله ضروری به نظر میرسد که چرخها را به عنوان جرمهای متمرکز جداگانه در نظر بگیریم. در این حالت، جرم متمرکزی که نمایانگر بدنه است جرم فنربندی شده می باشد و چرخها به عنوان جرم فنربندی نشده در نظر گرفته شدهاند.

برای معرفی یک جرم منفرد، وسیله نقلیه بعنوان یک مجموعه متمرکز در مرکز ثقل خود (C.G.) همانگونه که در شکل ۶ نشان داده شده است در نظر گرفته می شود.



شکل ۶. سیستم محور مختصات وسیله نقلیه مطابق استاندارد SAE

سیستم مختصات ثابت خودرو

در صفحه مختصات، حرکتهای وسیله نقلیه با توجه به مختصات جهت دست راست تعریف می شود که در مرکز ثقل خودرو C.G. واقع شده و با وسیله نقلیه حرکت می کند.

بر اساس قرارداد استاندارد SAE(Society of Automotive Engineers) مختصات به شرح زیر است:

x : جهت جلو و روی سطح افق تقارن

y : جهت جانبی و از سمت راست وسیله ی نقلیه خارج می شود

z : جهت پایین با توجه به وسیله نقلیه

p : سرعت پیچشی (Roll Velocity) حول محور x

q : سرعت دورانی(Pitch Velocity) حول محور y

r : سرعت چرخشی(Yaw Velocity) حول محور z

متغیرهای حرکت

معمولاً با توجه به سیستم مختصات ثابت وسیله نقلیه و سیستم مختصات ثابت زمین، حرکت خودرو با سرعتهای در جهت جلو، جانبی، عمودی،پیچشی، چرخشی و دورانی تعریف می شود.

سیستم مختصات ثابت زمین

وضعیت و مسیر حرکت خودرو در خط سیـر مانور، با توجـه به سیستـم محور مخـتصات جهت دست راست که بروی زمین ثـابت است، تعـریف میشود. معمولاً انتخاب سیستم مختصات ثابت وسیله نقلیه، همزمان با نقطه شروع مانور میباشد. سیستم مختصات (شکل ۷) به شرح زیر است:

X:حرکت به جلو

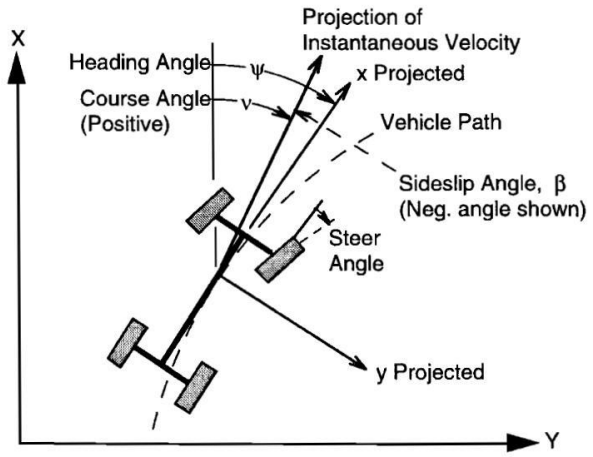
Y:حرکت به سمت راست

Z:حرکت عمودی (مثبت به سمت پایین)

Ψ: زاویههدینگ(زاویه بینx و X در سطح زمین)

ν: زاویه خط سیر (زاویه بین بردار سرعت وسیله ی نقلیه و محور X می باشد)

β: زاویه لغزش جانبی(زاویه بین محور x و بردار سرعت وسیله نقلیه)



شکل ۷. حرکت وسیله نقلیه در یک سیستم مختصات ثابت بر روی زمین

زوایای اویلر

رابطه بین سیستم مختصات ثابت وسیله نقلیه با سیستم مختصات ثابت زمین توسط زوایای اویلر تعریف میشود.

نیروها

نیروها و ممانها معمولاً همانگونه که بر روی وسیله نقلیه عمل می کنند، تعریف می شوند. بنابراین در خودرو، نیروی مثبت در جهت طولی محور x، نیروی رو به جلو است. نیروی بار روی چرخ به سمت بالا عمل میکند و بنابراین منفی و در جهت منفی z است.

با تعاریف ارائه شدهدر سیستمهای مختصات و نیروها، میتوان معادلههایی برای تحلیل و توصیف کارکرد خودرو وضع نمود.

قانون دوم نیوتن

- مهمترین قانون که به کمک آن بیشتر تحلیلهای دینامیک خودرو صورت می گیرد، قانون دوم اسحاق نیوتن می باشد. این قانون هم در سیستم های دورانی و هم در سیستمهای انتقالی به کار می رود.

سیستم های انتقالی: مجموع نیروهای بیرونی عمل کننده بر روی بدنه خودرو در جهت موردنظر، با حاصل ضرب جرم خودرو و شتاب در همان جهت (با فرض ثابت بودن جرم) مساوی است:

$$\sum F_x = M.a_x$$

به طوری که:

F_xنیروها در جهت x

Mمقدار جرم بدنه خودرو

a_x شتاب کند شونده در جهت x

سیستم های دورانی: مجموع گشتاورهای عمل کننده بر روی بدنه خودرو در حول محور مورد نظر، با حاصلضرب گشتاور دورانی اینرسی و شتاب زاویهای حول همان محور مساوی است:

$$\sum T_x = I_{xx}.\propto_x$$

به طوری که:

T_xگشتاور حول محور x

I_{xx}ممان اینرسی حول محور x

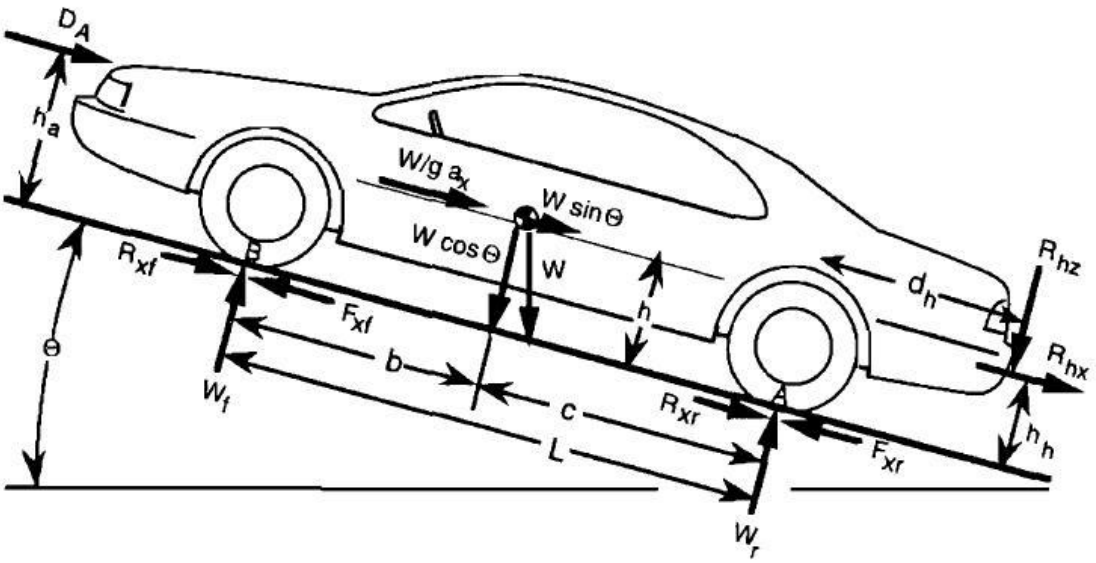
$\propto_x$ شتاب حول محور x

بارهای دینامیکی وارد بر اکسل

تعیین بارهای دینامیکی وارد بر اکسل یا به اصطلاح بارهای اکسل بر روی وسیله نقلیه تحت شرایط قراردادی، اولین کاربرد ساده قانون دوم نیوتن است.

در اولین گام، تحلیل شتاب و کارکرد ترمز دارای اهمیت است، چون بارهای اکسل اثر رانش را در هر اکسل مشخص می کند و بر شتاب، شیب و حداکثر سرعت و موانع رانشی اثر میگذارد.

وسیله نشان داده شده در شکل ۸را که در آن، بیشتر نیروهای موثر بر یک وسیله نقلیه ارائه شده است، در نظر بگیرید.



شکل ۸. دیاگرام آزاد نیروهای وارد بر یک خودرو

- $W= m.g$وزن وسیله نقلیه در مرکز ثقل آن برابر با مقدار جرم، در شتاب جاذبهمی باشد. وزن در روی سطح شیبدار دارای دو جزء می باشد: یکی جزء کسینوس که بر سطح جاده عمود بوده و دیگری جزء سینوس که موازی سطح جاده است.
- اگر وسیله نقلیه در جاده حرکت کند، اثر نیروی اینرسی موسوم به نیروی دالامبر به وسیله $\frac{W}{g} a_x$ تعریف می شود و نیروی اینرسی در مرکز ثقل، مخالف جهت شتاب عمل می کند.
- چرخها نیروی عمودی را از طرف جاده تحمل خواهند کرد که با W_r, W_f نشان داده می شود که به ترتیب وزن های دینامیکی بر روی چرخهای جلو و عقب هستند.
- نیروی رانشF_{xr}وF_{xf}و یا نیروهای مقاوم غلتشیR_{xr}وR_{xf} در سطح زمین در محل تماس چرخ با زمین عمل می کنند.
- D_A مساوی است با نیروی آیرودینامیکی که بر روی بدنه وسیله نقلیه عمل می کند. عملکرد این نیرو در نقطهایدر بالای سطح زمین با ارتفاعh_a نشان داده می شود.
- R_{hz} وR_{hx}نیروهای طولی و نیروهای عمودی هستند که در نقطه اتصال یدک کش، زمانی که وسیله نقلیه یک تریلر را می کشد، عمل میکنند.

بارهایی که روی اکسل حمل می شوند، در حالت سکون خودرو شامل اجزاء استاتیکی هستند و در حالت حرکت خودرو علاوه بر بار استاتیکی، بار انتقال یافته از اکسل جلو به عقب (و یا بالعکس) با توجه به سایر نیروهای عمل کننده بر روی وسیله نقلیه مؤثر خواهد بود.

بار روی اکسل جلو را میتوان با مجموع گشتاورهای حول نقطه A زیر چرخهای عقب، بدست آورد. با فرض اینکه خودرو در نقطه چرخش، شتاب نمیگیرد، مجموع گشتاورهای نقطه A باید صفر باشد.

$$\tau = F.r$$

طبق قانون SAE، گشتاور در جهت عقربههای ساعت حول نقطه Aمثبت است. آنگاه داریم:

$$W_f L + D_A h_a + \frac{W}{g} a_x h + R_{hx} h_h + R_{hz} d_h + W\ h\ Sin\theta - W\ c\ Cos\theta = 0$$

توجه داشته باشید که حرکت رو به بالا، برابر با زاویه مثبتθمی شود، بطوریکه سینوس مثبت میشود. در حرکت رو به پایین سینوس منفی خواهد بود. از معادله بالا میتوان W_f و از معادله مشابه حول نقطه B میتوانیم W_rرا به دست آوریم. آنگاه عبارتهای ریاضی بار هر اکسل به صورت زیر خواهد بود:

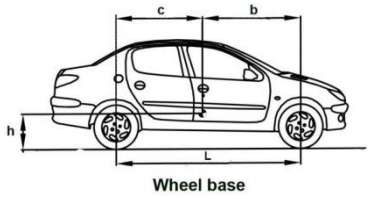
$$W_f = \frac{W\ c\ Cos\theta - D_A h_a - \frac{W}{g} a_x h - R_{hx} h_h - R_{hz} d_h - W\ h\ Sin\theta}{L}$$

$$W_r = \frac{W\ b\ Cos\theta + R_{hx} h_h + R_{hz}(d_h + L) + \frac{W}{g} a_x h + D_A h_a + W\ h\ Sin\theta}{L}$$

بارهای استاتیکی روی سطح زمین

زمانی که وسیله نقلیه در سطح جاده ساکن است معادلات بار به طور قابل ملاحظهای ساده می شوند. سینوس برابر با صفر، کسینوس برابر با یک و متغیرهای $R_{hx}، R_{hz}، a_x، D_a h_a$ برابر با صفر خواهند بود. بنابراین:

$$W_{fs} = \frac{Wc}{L} \qquad W_{rs} = \frac{Wb}{L}$$



Wheel base

شتاب در سرعت پایین

زمانیکه وسیله نقلیه در سطح جاده با سرعت کم شتاب می گیرد،D_Aصفر است (فرض بر این است که نیروهای اتصال یدک کش تریلر وجود ندارد).

بارهای روی اکسلها به شرح زیر هستند:

$$W_f = W\left(\frac{c}{L} - \frac{a_x}{g}\frac{h}{L}\right) = W_{fs} - W\frac{a_x}{g}\frac{h}{L}$$

$$W_r = W\left(\frac{b}{L} + \frac{a_x}{g}\frac{h}{L}\right) = W_{rs} + W\frac{a_x}{g}\frac{h}{L}$$

بنابراین زمانی که وسیله نقلیه شتاب می گیرد، بار وارد شده، متناسب با شتاب جاذبه و نسبت ارتفاع مرکز جرم به فاصله بین محور جلو و عقب، از اکسل جلو به اکسل عقب منتقل می شود.

بارها بر روی سطح شیبدار

اثر شیب بر روی بارهای وارد بر اکسلها نیز از اهمیت برخوردار است. شیب به عنوان بلند شدن در هنگام حرکت تعریف می شو د. این نسبت همان تانژانت زاویه شیبθ می باشد که معمولاً در بزرگراههای داخل کشور به ۴ درصدمحدود می گردد. در جادههای اصلی و جادههای فرعی معمولاً شیب بین ۱۰الی۱۲ درصد میباشد. کسینوس زاویه های کوچک، به یک نزدیک است و سینوسآنها به خود زاویه نزدیک است. به عبارت دیگر:

$\text{Sin } \theta \cong \theta$
$\text{Cos } \theta \cong 1$

بنابراین، بارهای روی اکسل که تحت تأثیر شیب هستند، به شرح زیر خواهند بود:

$$W_f = W\left(\frac{c}{L} - \frac{h}{L}\theta\right) = W_{fs} - W\frac{h}{L}\theta$$

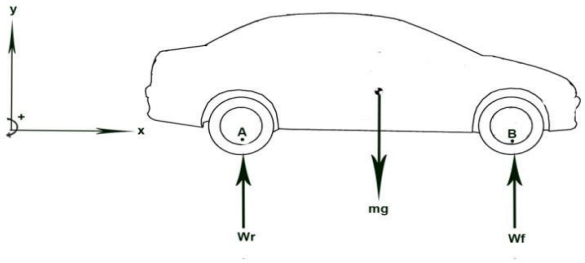
$$W_r = W\left(\frac{b}{L} + \frac{h}{L}\theta\right) = W_{rs} + W\frac{h}{L}\theta$$

این در حالی خواهد بود که شیب مثبت باعث می شود که بار، از اکسل جلو به اکسل عقب منتقل می شود.

مثال ۱

در یک خودروی ۴ در بدون سرنشین، نیروی وارد بر اکسل جلو2313 Ib و بر اکسل عقب 1322 Ib میباشد. فاصله بین چرخهای عقب و جلو L=109 Inch میباشد . موقعیت عقب و جلوهرکز ثقل خودرو را تعیین کنید.

W_{fs} = W_{rs}2313Ib= 1322Ib



$W = 1322 + 2313 \Rightarrow W = 3635\ Ib$

$W_{fs} = W\frac{c}{L} \Rightarrow 3635\frac{c}{109} \Rightarrow c = \frac{2313 \times 109}{3635} \Rightarrow c = 69.35\ inch$

$L = b + c \Rightarrow b = 109 - 69.35 = 39.64\ inch$

فصل دوم

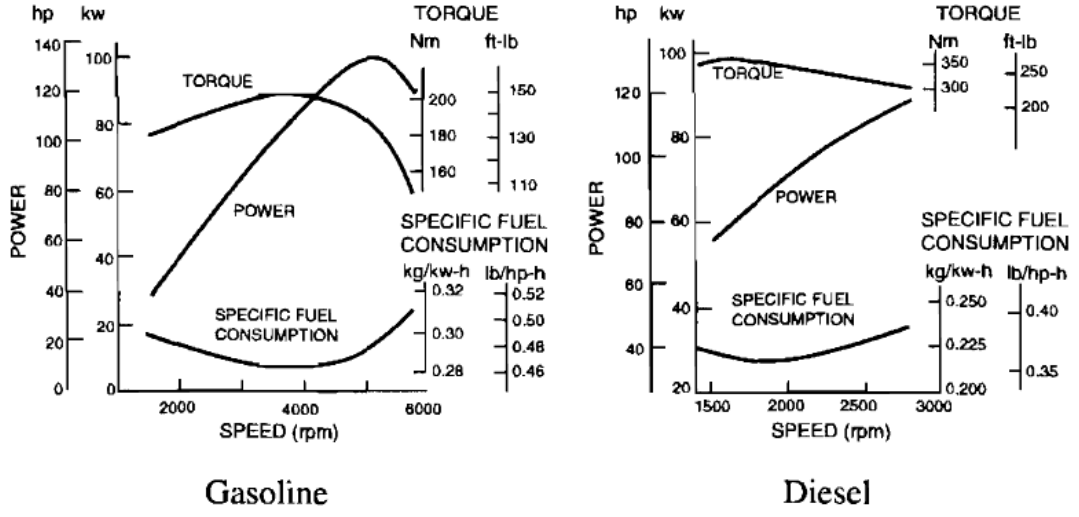
عملکرد شتاب

شتاب با قدرت محدود

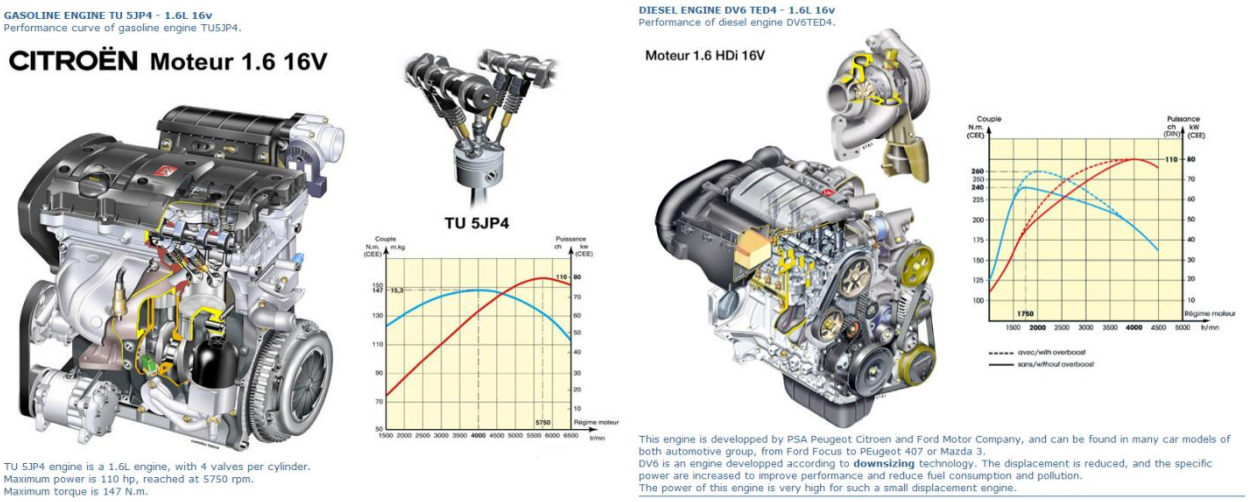
تحلیل شتاب با قدرت محدود، مستلزم آزمایش مشخصههای موتور و اثرات متقابل آنها در زنجیره قدرت است.

موتور (Engine)

مـوتـور منبع نیروی محرکه خودرو است. موتورها را میتوان به وسیله منحنیهای گشتاور و قدرت که تابعی از سرعت است مشخص کرد. شکل ۹ نمونهای از منحنیهای مربوط به موتورهای دیزلی و بنزینی را نشان میدهد.

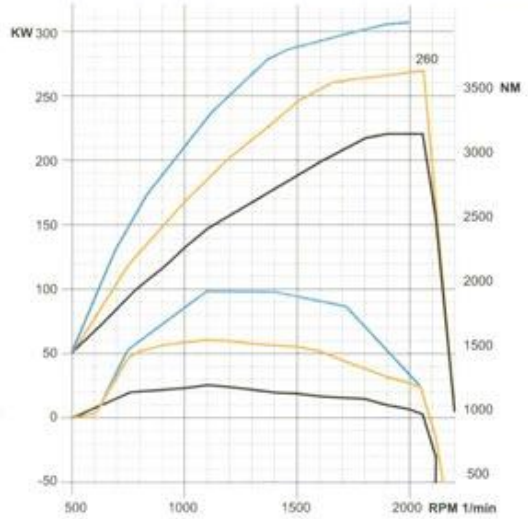


شکل ۹. مشخصه های عملکردی در موتورهای دیزلی و بنزینی



شکل۱۰. مشخصه های عملکردی در موتورهای دیزلی و بنزینیبه عنوان مثال در خودروی سواری سیتروئن

I.D.E.M 457 Series



OM 457 LA
OM 457 HLA
Specification

	457 LA	457 HLA	
No. Cylinder	6 inline	6 inline	تعداد سیلندر
Cyl. Bore dia./Stroke	128/155	128/155	قطر سیلندر / کورس (میلیمتر)
Stroke / Bore relation	1.21	1.21	نسبت کورس به سیلندر
Displacement	12	12	حجم موتور (لیتر)
Displacement cylinder	2	2	حجم سیلندر (لیتر)
Compression ratio	17.25:1	17.25:1	نسبت تراکم
Max. Output(kw)	220/260	306	حداکثر قدرت خروجی(کیلو وات)
Max. Output(hp)	300-353	410	حداکثر قدرت خروجی(اسب بخار)
@rated RPM	2000	2000	در دور (دور بر دقیقه)
@BMEP (bar)	21	21	در فشار متوسط موتر(بار)
Max Torque(N-m)	1250/1600	2000	حداکثر گشتاور (نیوتن بر متر)
@RPM	1100	1100	در دور (دور بر دقیقه)
Engine dry weight(kg)	900	900	وزن موتورخشک (کیلوگرم)
Power / Weight ratio	3/2.5	2.2	نسبت وزن بر قدرت (کیلوگرم بر کیلو وات)
Power / Weight ratio	4/3.4	2.9	نسبت وزن بر قدرت (کیلوگرم بر اسب بخار)
Length(mm)	1273	1273	طول (میلیمتر)
width(mm)	940	1230	عرض (میلیمتر)
height(mm)	1080	760	ارتفاع (میلیمتر)
Engine control	Electronic	Electronic	کنترل موتور
Injection Nozzles	8 holes	8 holes	نازل پاشش سوخت
Nozzle position	Vertical	Vertical	موقعیت نازل
Nozzle location	Central	Central	محل نصب نازل
Max.injec. Pressure(bar)	1800	1800	حداکثر فشار پاشش (بار)
Intake valves	2	2	سوپاپ هوا
Exhaust valves	2	2	سوپاپ دود
Cumbustion method	Low swirl	Low swirl	روش احتراق
Cumbustion chamber	Shallow bowl	Shallow bowl	محفظه احتراق
Cold start assist	Flame start device(sA)	Flame start device (sA)	کمک استارت (سرد)
Cold start temperature	-20(-30 with flame start)	-20(-30 with flame start)	دمای استارت سرد
EURO 2	Yes	Yes	استاندارد EURO 2
USA EPA 94	yes	Yes	استاندارد USA EPA 94
Engine brake system	Decompression value	Decompression value	سیستم ترمزی موتور

شکل۱۱. مشخصه های عملکردی موتور OM457ساخت شرکت I.D.E.M تبریز

منحنی گشتاور در موتورهای بنزینی، معمولاً دارای یک مقدار بیشینه در محدوده میانی سرعت کارکرد موتور که با مشخصههای سیستم سوخت رسانی کنترل میشود هستند.

با مقایسه این دو منحنی در مییابیم که موتورهای دیزلی، منحنی گشتاور صافتر و بدون انحنـایی دارند که با کاهش دور موتور، به سمـت بـالا میرود. این مشخصه که از طریق برنامهریزی سیستم سوخت تزریقی کنترل می شود به ساخت موتورهایی با گشتاور بالا و قدرت زیاد منتهی شده است که در خودروهای تجاری، مورد استفاده قرار می گیرند.

تفاوت عمده دیگر میان این دو نوع موتور، مصرف سوخت مخصوص(BSFC) آن موتور است. در کار آمدترین حالت، موتورهای بنزینی ممکن است به سطح مصرف سوخت در حدود (0.4 Ib/hp-h) برسند، در حالی که در موتورهای دیزلی این میزان تقریبا" 0.2 یا کمتر است.

The BSFC calculation (in metric units) [edit]

To calculate BSFC, use the formula $BSFC = \frac{r}{P}$

Where:

r is the fuel consumption rate in grams per second (g/s)
P is the power produced in watts where $P = \tau\omega$
ω is the engine speed in radians per second (rad/s)
τ is the engine torque in newton meters (N·m)

The above values of r, ω, and τ may be readily measured by instrumentation with an engine mounted in a test stand and a load applied to the running engine. The resulting units of BSFC are grams per joule (g/J)

Commonly BSFC is expressed in units of grams per kilowatt-hour (g/(kW·h)). The conversion factor is as follows:

BSFC [g/(kW·h)] = BSFC [g/J]×(3.6×10^6)

The conversion between metric and imperial units is:

BSFC [g/(kW·h)] = BSFC [lb/(hp·h)]×608.277
BSFC [lb/(hp·h)] = BSFC [g/(kW·h)]×0.001644

The relationship between BSFC numbers and efficiency [edit]

To calculate the actual efficiency of an engine requires the energy density of the fuel being used.

Different fuels have different energy densities defined by the fuel's heating value. The lower heating value (LHV) is used for internal combustion engine efficiency calculations because the heat at temperatures below 150 °C (300 °F) cannot be put to use.

Some examples of lower heating values for vehicle fuels are:

Certification gasoline = 18,640 BTU/lb (0.01204 kW·h/g)
Regular gasoline = 18,917 BTU/lb (0.0122225 kW·h/g)
Diesel fuel = 18,500 BTU/lb (0.0119531 kW·h/g)

Thus a diesel engine's efficiency = 1/(BSFC*0.0119531)
and a gasoline engine's efficiency = 1/(BSFC*0.0122225)

شکل ۱۲. نحوه محاسبه BSFC و رابطه بین BSFC و بازده

رابطه گشتاور و قدرت را با سرعت میتوان اینگونه بیان کرد:

$$\text{قدرت}\left(\frac{ft-Ib}{sec}\right) = \text{گشتاور}(ft-Ib) \times \text{سرعت}(\frac{rad}{Sec})$$

$$P = T.\omega$$

قدرت بر حسب اسب بخار = $T(ft-Ib) \times \omega_e(\frac{rad}{Sec})/550 = T(ft-Ib) \times RPM/5252$

$$\text{قدرت}(\text{KW}) = 0.746 \times \text{HP}$$

$$1\text{HP} = 550\ \frac{ft - Ib}{sec}$$

نسبت قدرت موتور به وزن خودرو، اولین عامل تعیین کننده شتاب است. ابتدا به منظور تعدیل سرعت بدون در نظرگرفتن نیروهای مقاوم بر روی خودرو محدوده بالاتری از شتاب بدست میآید. بنابراین با استفاده از قانون دوم نیوتن داریم:

$$Ma_x = F_x$$

که در این رابطه M جرم خودرو، a_x شتاب در جهت مثبت، F_x نیروی رانش در چرخهای محرک میباشد.

از آنجاییکه قدرت محرک برابر حاصلضرب نیروی رانش در سرعت جلو رونده می باشد میتوان معادله فوق را به صورت زیر نوشت:

$$a_X = \frac{1}{M}F_X = 550\frac{g}{V}\frac{HP}{W}$$

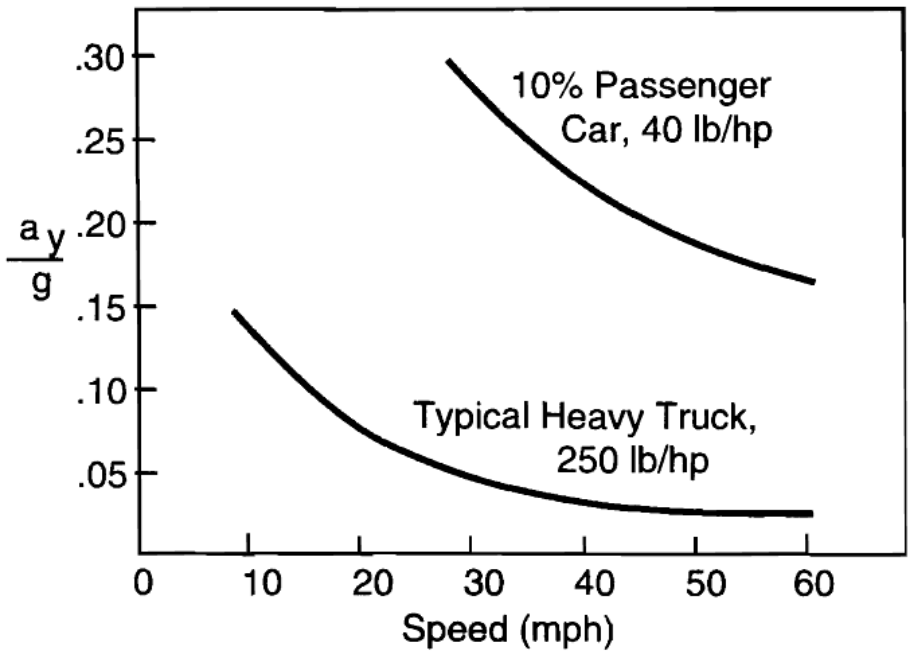
g: ثابت جاذبه زمین $32.2ft/sec^2$

$V(ft/sec)$: سرعت جلورونده خودرو

HP: قدرت برحسب اسب بخار موتور

$W\ (Ib)$:وزن خودرو

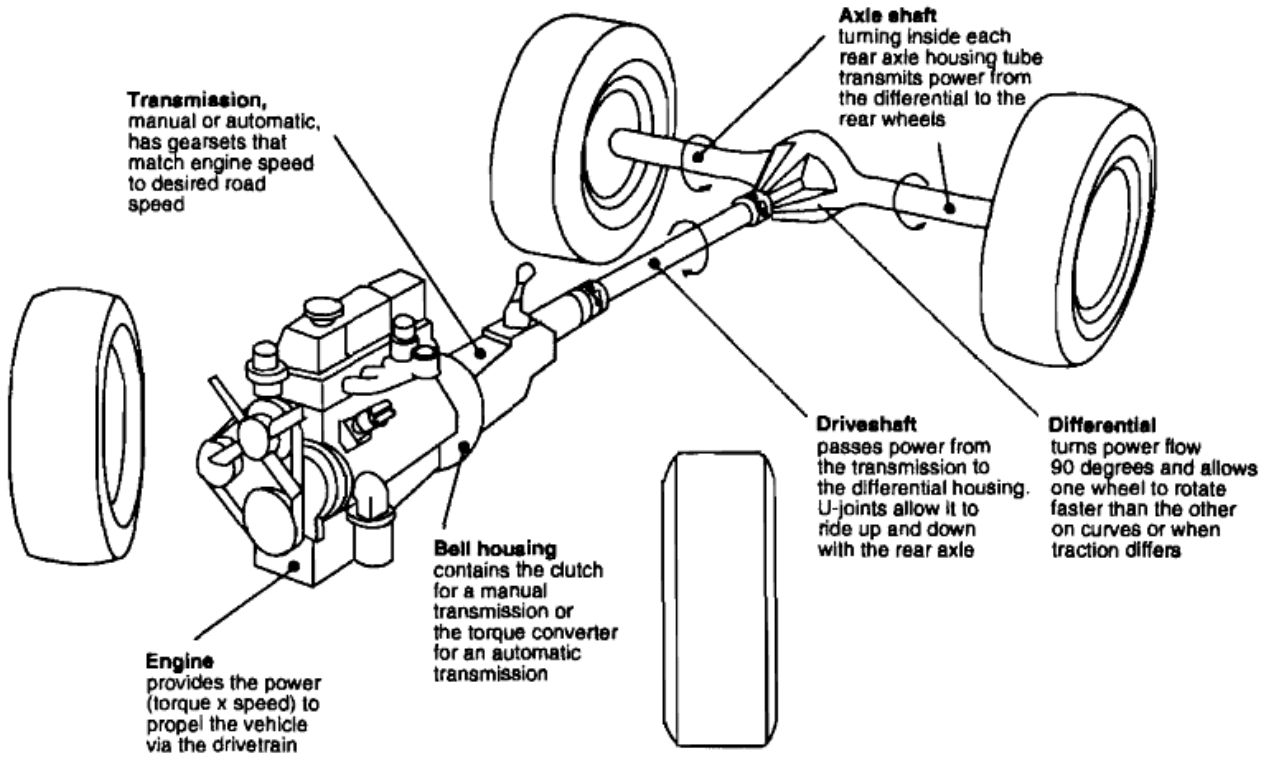
قابلیت شتاب به دلیل وجود عبارت سرعت در مخرج با افزایش سرعت باید کاهش یابد. رابطه کلی معادله فوق در شکل ۱۳ برای انواع خودروهای سواری و کامیونت نشان داده شده است. همانطوری که انتظار میرود کامیونهای سنگین به دلیل نسبت کمتر مطلوب قدرت به وزن دارای عملکرد پایینتری نسبت به خودروهای سواری می باشند.



شکل ۱۳. اثر سرعت برروی ظرفیتهای شتاب اتومبیلها و کامیونها

زنجیره قدرت

تخمین دقیقتر عملکرد شتاب، به مدلسازی سیستمهای مکانیکی نیاز دارد که از طریق آنها نیروی موتور به زمین منتقل می شود.شکل ۱۴ اجزاء مهم زنجیره قدرت را نشان میدهد.



شکل ۱۴. اجزای اصلی در زنجیره قدرت

در مورد موتور باید به خاطر داشت که گشتاور موتور با سرعت یکنواخت، توسط یک دینامومترطبق شکل ۱۵ اندازهگیری می شود، بنابراین در عمل گشتاور به زنجیره حرکت منتقل میشود.

شکل ۱۵. دستگاه دینامومتر

این گشتاور به منظور سرعت دادن به اجزاء اینرسیدار در حال دوران بدون توجه به بارهای اضافی کاهش مییابد. گشتاور تبدیل کلاچ را به عنوان ورودی گیربکس میتوان با استفاده از قانون دوم نیوتن به شرح زیر تعیین کرد:

$$T_c = T_e - I_e \alpha_e$$

T_c : گشتاور کلاچ (ورودی گیربکس)

T_e : گشتاور موتور در سرعت داده شده (طبق اطلاعات دینامومتر)

I_e : اینرسی دورانی موتور

α_e : شتاب دورانی موتور

گشتاور خروجی گیربکس با نسبت دندههای گیربکس افزایش پیدا میکند، ولی به خاطر وجود اینرسی در دندهها و شفتها کاهش مییابد. اگر اینرسی گیربکس از جانب ورودی آن مشخص شود، گشتاور خروجی آن طبق معادله زیر محاسبه میگردد:

$$T_d = (T_C - I_t \alpha_e) N_t$$

T_d: گشتاور خروجی گیربکس

N_t: نسبت دندههای گیربکس

I_t : اینرسی دورانی گیربکس (با توجه به موتور)

به همین ترتیب گشتاور موجود بر روی اکسلها برای شتاب گرفتن در حال چرخش و تولید نیروی رانش در زمین کاهش مییابد و این کاهش به دلیل وجود اینرسی اجزاء خط انتقال مابین گیربکس و دیفرانسیل میباشد. لذا معادله آن نیز بدین صورت است:

$$T_a = (T_d - I_d \alpha_d) N_f = F_x \times r_t + I_w \alpha_w$$

و در آن:

T_a- گشتاور اکسلها

I_d- اینرسی دورانی میل گاردان

F_X- نیروی رانش در سطح

α_d- شتاب دورانی میل گاردان

r- شعاع چرخها

N_f- نسبت دنده دیفرانسیل

I_w- اینرسی دورانی چرخها و محورهای اکسلها

α_w- شتاب دورانی چرخها

رابطه بین شتابهای زاویهای موتور، گیربکس، میل گاردان و چرخها با نسبت دندهها به صورت زیر است:

$$\alpha_d = N_f . \alpha_w$$

$$\alpha_e = N_t \alpha_d = N_t N_f \alpha_w$$

برای بدست آوردن نیروی رانش بر روی سطح زمین، معادلات ذکر شده بالا را میتوان با هم ترکیب کرد. توجه کنید که شتاب خودرو a_x برابر است با شتاب زاویهای چرخ α_w در شعاع چرخ است که نتیجه میدهد:

$$F_x = \frac{T_e N_{tf}}{r} - \left[(I_e + I_t) N_{tf}^{\,2} + I_d N_f^{\,2} + I_w \right] \frac{a_x}{r^2}$$

$$N_{tf} = N_t N_f$$

اثر تلفات مکانیکی را میتوان با اضافه کردن مقدار راندمان به عبارت اول سمت راست معادله فوق محاسبه کرد.

$$F_x = \frac{T_e N_{tf} \eta_{tf}}{r} - \left[(I_e + I_t) N_{tf}^{\,2} + I_d N_f^{\,2} + I_w \right] \frac{a_x}{r^2}$$

بنابراین معادله فوق یک فرمول را برای نیروی رانش موتور ارائه میدهد که شامل دو جزء است.

۱ - اولین عبارت جبری سمت راست، حاصلضرب گشتاور موتور در نسبت ترکیبی دندهها است که برابر با راندمان سیستم محرکه است و در نهایت به شعاع چرخ تقسیم می شود. این عبارت نیروی رانش ثابت و موجود در زمین را برای خنثی کردن نیروهای بار جاده-ای (مقاومت آیرودینامیکی و غلتشی)، برای سرعت گرفتن یا بالا رفتن از شیب را نشان میدهد.

۲ - دومین عبارت، نشان دهنده افت نیروی رانش ناشی از اینرسی موتور و اجزاء متحرک است. عبارت درون براکتها نشان میدهد که اینرسی متناسب با هر جزء به وسیله مجذور نسبت دنده مابین اجزاء و چرخها، افزایش مییابد.

اکنون با شناخت نیروی رانش، پیش بینی عملکرد شتاب خودرو امکان پذیر میباشد. در تعریف شتاب باید به تمام نیروهایی که در دیاگرام آزاد خودرو نشان داده شده، توجه شود.

معادله به شکل زیر در میآید:

$$Ma_x = \frac{W}{g}a_x = F_x - R_x - D_A - R_{hx} - W\sin\theta$$

M- جرم خودرو

a_x - شتاب در راستای طولی

F_x- نیروی رانش سطح زمین

R_x- نیروی مقاوم غلتشی

D_A - نیروی مقاوم آیرودینامیکی

R_{hx}- نیروهای مقاوم (یدک کش)

F_x تابع گشتاور موتور و اینرسی دورانی است. برای سهولت در محاسبه، اینرسیهای دورانی به دست آمده از معادله:

$$F_x = \frac{T_e N_{tf}\eta_{tf}}{r} - \left[(I_e + I_t){N_{tf}}^2 + I_d {N_f}^2 + I_w\right]\frac{a_x}{r^2}$$

با جرم خودرو جمع میشود تا یک معادله ساده به شکل زیر بدست آید:

$$(M + M_r)a_x = \frac{W + W_r}{g}a_x = \frac{T_e N_{tf}\eta_{tf}}{r} - R_x - D_A - R_{hx} - W\sin\theta \qquad (*)$$

به طوریکه M_r جرم معادل اجزاء دورانی میباشد.

ترکیب دو جرم $(M + M_r)$ برابر با جرم موثر است و نسبت $\frac{(M+M_r)}{M}$ را عامل جرم میگویند.

عامل جرم به دنده به کار گرفته شده بستگی دارد به مقادیر نمونه عامل جرم در جدول زیر دقت کنید.

انواع خودرو	دنده سبک	دنده دو	دنده یک	دنده سنگین
خودروهای سواری کوچک	1.11	1.2	1.5	2.4
خودروهای سواری بزرگ	1.09	1.14	1.3	--
تریلرها و کامیون ها	1.09	1.2	1.6	2.5

مقادیر داده شده به صورت زیر بدست میآید:

$$\text{فاکتور جرم} = 1 + 0.04 + 0.0025\, N_{tf}^2$$

معادله $(*)$را می توان برای محاسبه عملکرد شتاب به صورت دستی برای بعضی از سرعتها بهکار برد. اما اگر محاسبه تکراری نیاز باشد (برای مثال محاسبه شتاب از صفر تا سرعت حداکثر)، میتوان از برنامه کامپیوتری استفاده نمود.

نکته!

در این رابطه به استثنای دنده تمام نیروهای دیگر با تغییر سرعت تغییر میکنند و بایستی در هر سرعتی محاسبه شوند.