طراحی سیستم‌های چرخ، ترمز، فرمان

دکتر ابراهیمی‌نژاد

شاسی: اسکلت و قاب خودرو که سیستم‌های خودرو بر روی آن سوار یا آنها را در خود جای می‌دهد.

تقسیمات[1] اصلی خودرو

Body	→	outer body	→	به منظور زیبایی نیاز به طراحی خاصی دارد.
بدنه		inner body	→	فضای داخل کابین
		under body	→	صفحه‌ی زیرین خودرو (مستقیماً نقاط اتصال شاسی را در بر می‌گیرد)
Powertrain	→	Engine	→	منظور موتورهای احتراق داخلی است
قوای محرکه		Electric motor	→	در خودروهای برقی و هیبرید
		Subsystems	→	Fuel system Cooling system
Driveline	→	Gearbox		
انتقال قدرت		Clutch		
		Differential		
		Propeller shaft (Cardon shaft)	→	در خودروهای با محور محرک عقب
		Universal joint (constant velocity joint)		
		Wheel hub and knuckle		
Chassis systems	→	Suspension: Passive Semiactive Active		کنترل حرکت‌های قائم بدنه خودرو: Vertical Dynamics: **Z**
		Steering		کنترل حرکت‌های عرضی خودرو: Lateral Dynamics: **Y**
		Braking		کنترل حرکت‌های طولی خودرو: Longitude Dynamics: **X**
		Wheel Assembly		
Accessories	→	تجهیزات جانبی	→	مکانیکی – الکتریکی

۱- partitions

بدنه خودرو هم باید استحکام خوبی داشته باشد و هم باید از لحاظ نویز و ارتعاشات[۲] و فاصله‌ی آزادی که از زمین دارد و ارتفاع آزاد خودرو[۳] از سطح زمین را مشخص می‌کند، مناسب طراحی شده باشد.

بعضی خودروهای امروزی شاسی و بدنه یکپارچه دارند ← Unitized Frame Body یا Monocoque

سیستم تعلیق فعال (Active) با توجه به شرایط جاده می‌تواند فنریت و میرایی را تنظیم کند

«زوایای اصلی خودرو حول محور»

x → roll angle
y → pitch angle
z → yaw angle

زاویه‌ی بین بردار سرعت و راستای x ← sideslip angle

راستای حرکت خودرو یا همان بردار سرعت لزوماً با راستای تایر یکی نیست. حرکت جانبی بدنه خودرو یا بعبارتی راستای بردار سرعت خودرو زاویه‌ای αای را با راستای تایرها که در راستای محور x قرار دارند می‌سازد که این زاویه sideslip angle نام دارد. این زاویه هم در دینامیک عرضی خودرو و هم در مبحث نیروهای عرضی تایر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

سیستم‌های شاسی، عبارتند از سیستم‌هایی که بر روی قاب شاسی سوار هستند. خودروسازها معمولاً غیر از بدنه، سیستم قوای محرکه (موتور) و سیستم انتقال قدرت، بقیه‌ی سیستم‌هایی که بر روی شاسی سوار هستند را سیستم‌های شاسی می‌گویند. اگر چه بدنه (Body)، موتور (powertrain) و سیستم انتقال قدرت (Drivetrain) نیز روی شاسی سوار هستند، ولی با توجه به اهمیت این بخشها، آنها را در تقسیمات اصلی خودرو (partition ها) بصورت جداگانه در نظر می‌گیریم و جزو سیستمهای شاسی به شمار نمی‌آیند.

نکته: قاب شاسی ← ساختار اصلی خودرو

«وظایف اصلی سیستم شاسی»

۱- تحمل وزن و بارهای وارده از طرف بدنه، گیربکس ← بار استاتیکی قسمت ثابت

۲- بار متحرک ← مسافر و بار خودرو ← بار استاتیکی قسمت متغیر

۳- تحمل نیروی بوجود آمده از ترمزگیری و شتابگیری خودرو که طبق اصل دالامبر باعث ایجاد نیروی طولی می‌شوند.

۴- نیروهای گریز از مرکز ← نیروهای عرضی

۵- در راستای عمود تمامی حرکت‌هایی که از طرف جاده منتقل می‌شود.

۲- NVH (Noise, Vibration and Harshness)

۳- Clearance

«نیروهایی که به قاب شاسی وارد می‌شود»

عملکرد شاسی با توجه به نیروهایی که تحمل می‌کند تعیین می شود.

۱- نیروی استاتیکی static Loads

۲- نیروهایی که در مدت زمان کوتاهی اعمال می‌شـــوند: نیروهای اجزا و قطعات خودرو. مدت زمانی که بار اعمال می‌شود هم مهم است Short duration loads

۳- نیروهایی که در هنگام حرکت در مسیر انحنا بوجود می‌آیند Momentary loads

۴- ضربه‌های طولی یا لحظه‌ای impact loads

۵- نیروهای شتابگیری و ترمزگیری – دالامبر inertia loads

۶- نیروهای فراتر از تحمل خودرو over loads

برای طراحی شاسی، سه رویکرد اصلی وجود دارد:

۱. **Conventional frame**: (قاب و شاسی مرسوم)

Body on Frame – BoF

۲. **Integral frame**: شـــاســـی بصـــورت یکپارچه با under Body خودرو طراحی و ساخته می‌شود.

Body Frame integral – BFI
Unitized Frame Body
Monocoque

۳.**semi-integral frame**: نیمـه ی عقبی خودرو (کابین) بصورت یکپارچه طراح می شود (که باید از ایمنی بالایی برخوردار با شد و طراحی و ساخت آن گران اســـت) و نیمه ی جلویی خودرو که در آن موتور قرار دارد و امکان دارد تحت ضربه قرار بگیرد را بصورت نرم قرار می‌دهند.

Monocoque[۴]: یک اصطلاح فرانسوی است که در آن از یک عنصر پوسته ای (Shell) به عنوان عضو مقاومتی (تحمل کننده نیرو) استفاده می‌شود (بعنوان مثال در سقف و درب ها از فیبر کربنی بدون هیچ گونه سازه مقاوم استفاده می‌شود). این گونه پوسته ها، با الهام از پوسته تخم مرغ، به گونه‌ای طراحی شده اند که مقاومت بالایی به آن می‌دهند و بعنوان یک عضو نیرویی استفاده می شوند. در انواع دیگر بدنه، پوسته عضو تحمل‌کننده‌ی نیرو نیست و مقاومت توسط استراکچر تأمین می‌شود.

در بعضی از بدنه‌های خودروها از مقاطع مربع (ناودانی)، مستطیل (قوطی) و دایره (لوله) استفاده می‌کنند و در بعضی مقاطع دیگر از مقاطع پروفیل H و I استفاده می‌کنند ← مقاطع تیرآهنی

Body – in – white (BIW): بدنه خام خودرو قبل از رنگ شدن را می‌گویند که enclosure ها (اجزایی که بدنه را می‌بندند مثل درب های کابین خودرو و درب های محفظه موتور و صندوق عقب) در آن نصب نشده اند. با توجه به اینکه Enclosureها تحمل‌کننده‌ی نیرو نیستند، هنگام انجام تست‌های ایمنی، بر روی بدنه نصب نمی‌شوند و تست ضربه را تنها روی BIW انجام می‌دهند.

«تقسیم‌بندی خودروها برحسب بدنه و کاربرد»

۱. **light vehicles** : (خودروهای سبک – سواری)

۲. **Medium vehicle Bodies** : SUV – Van – Pickup

۳. **Heavy vehicles**: Bus

«مقاطع مورد استفاده در قاب شاسی»

a) **channel sections** تحمل در برابر خمش – ناودانی

b) **Tubular sections** تحمل در برابر پیچش – لوله‌ای

c) **Box sections** تحمل در برابر پیچش و خمش -قوطی

۴- Monocoque: also structural skin, is a structural system where loads are supported through an object's external skin, similar to an egg shell. A true monocoque carries both tensile and compressive forces within the skin and can be recognized by the absence of a load carrying internal frame.

«الزامات طراحی بدنه خودرو»

۱. تا حد امکان سبک

۲. طراحی ساده ← استفاده از حداقل تعداد اجزاء

۳. فضای داخلی مناسب

۴. نیروها و ارتعاشات را تحمل کند.

۵. مقاوم در برابر باد

۶. ارزان و ساخت آسان

۷. از نظر شکل ظاهری جذاب باشد.

۸. توزیع مناسب نیروها

۹. عمر اتاق باید در برابر خستگی خوب باشد.

۱۰. باید دید مناسبی خودرو به راننده بدهد.

وزن خودرو ← W ← توزیع نیروهای وزن بر روی محورهای و چرخ‌های هر محور مهم است.

فاصله‌های مرکز جرم تا محور چرخ‌های جلو و عقب به ترتیب: b و c

نیرو در اصل دالامبر در حالت شتاب گیری و ترمزگیری: $F = \frac{w.a_x}{g}$

نیروهای استاتیکی روی محور جلو و محور عقب:

با گشتاورگیری حول دو محور جلو و عقب: $\begin{cases} W_{fs} = \frac{W.c}{L} \\ W_{rs} = \frac{W.b}{L} \end{cases}$

هرچه b کوچکتر باشد وزن روی محور عقب کمتر است و وزن بیشتری روی محور جلو می‌افتد.

نکته: بیشترین شتابی که به خودرو وارد می شود در هنگام دور زدن با سرعت بالا در مسیرهای با انحنای کوچک است:

$$\uparrow a = \frac{v^2}{r \downarrow}$$

ما در اینجا خودرو را در حالت Low Acceleration می‌گیریم که بتوانیم در حالت شبه استاتیکی بررسی کنیم. شتاب را بر اساس اصل دالامبر، بصورت یک نیرو در نظر می‌گیریم.

در حالت شتاب‌گیری و ترمزگیری ← $W_{fs} + W_{rs} = W$

← در اثر وجود شتاب، توزیع وزن بین محورها تغییر می‌کند، در نتیجه وزن روی هر یک از محورها تغییر می‌کند ولی در کل، مجموعشان ثابت است.

$$\begin{cases} W_f = W(\frac{c}{L} - \frac{a_x}{g} \times \frac{h}{L}) = W_{fs} - W.\frac{a_x}{g} \times \frac{h}{L} \\ W_r = W(\frac{b}{L} + \frac{a_x}{g} \times \frac{h}{L}) = W_{rs} + W.\frac{a_x}{g} \times \frac{h}{L} \end{cases}$$

مثبت و منفی بودن شتاب نیز تأثیر دارد یا بعبارتی همان در حالت ترمزگیری و شتابگیری.

شیب Grade

$\%G = \frac{rise}{run} = \tan\theta \Leftarrow \text{percent Grade} \Leftarrow \%G$ بصورت درصد بیان می شود.

$\text{grade}12\% = 0.12 = \text{tg}\theta \Rightarrow \theta = \text{tg}^{-1}(0.12)$

$\text{tg}\theta = \frac{\sin\theta}{\cos\theta} \approx \frac{\theta}{1}(\text{rad})$

فاصله ی عرض محورها: Track فاصله طولی محورها: Wheelbase

نکته: در مورد سیستم تهویه مطبوع داخل خودروها ← ventilation ← تنها نیروی force کولرها برامون مطرح نیست, بلکه نیروهای natural هم داریم.

نکته: طراحی سیستم تهویه مطبوع خودروها را با این فرض انجام میدهند که در هنگام حرکت و داشتن سرعت، شیشه‌های خودرو را پایین نکشیم.

نکته: ارتفاع و عرض تعیین شده برای خودرو در واقع تعیین‌کننده‌ی مقطع خودرو هستند.

معیارهای طبقه‌بندی خودروها در مؤسسات:

۱- قیمت ۲- ابعاد طول و عرض ۳- وزن ۴- مصرف سوخت

استایل های بدنه خودرو

sedan (saloon) →خودروهای سواری عادی با صندوق عقب

(station) **wagon** (Estate, Touring)

Luxury (Flagship models)

coupe → sedan شبیه → تفاوت فقط در دو درب بودن

coupe→convertible (cabriolet, Roadster) مثل → تفاوت در باز شدن سقف

van (MPV) → ارتفاع بلند، چند منظوره، تعداد سرنشین بالا، دارای یک در لغزنده

Suv: خودروهای شاسی بلند

Coupe : خودروهای دو درب

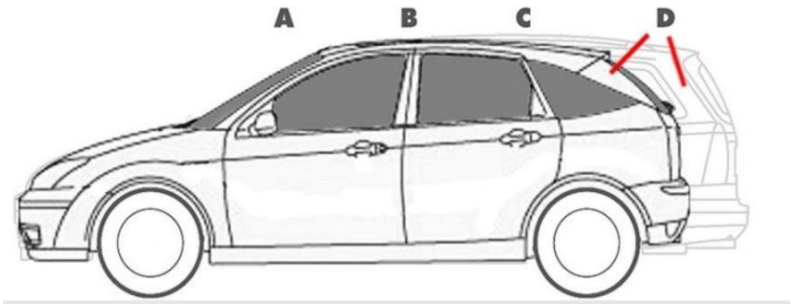
Multi purpose car : **Van**

نکته: در مورد حجم کابین سرنشینان و صندوق عقب ← طبقه‌بندی براساس حجم

نکته: دغدغه‌های اصلی ← مصرف سوخت ← نیروهای ایرودینامیک← میتوان رابطه‌ای بین حجم و سطح مقطع خودرو (عامل مهم در نیروهای مقاومت ایرودینامیک) پیدا کرد.

خودروهای استیشن، هاچبک و سدان ← میتوان این خودروها را از دید تعداد ستون طبقه‌بندی کرد.

نکته: در خودروهای hatch back و station wagon یک ستون ا ضافه داریم (ستون D)← این ستون در خودروهای sedan حذف شده است.



خودروهای سواری عادی با صندوق عقب→ **sedan (saloon)**

نکته: موتور تقویت شده نشان‌دهنده‌ی sport بودن خودرو است.

Off – road cars:
- سیستم تعلیق قوی ← تحمل نیروهای بالا
- ارتفاع بالا ← جاده های ناهموار
- دنده سنگین
- 4wheel-Drive

خودروهای notch back: خودروهایی هستند که عمق درب صندوق عقب آنها کمتر از درب صندوق عقب خودروهای sedan است و محل تقاطع صندوق عقب و شیشه عقب، دندانه‌ای V-شکل (V-notch) تشکیل شده است.

اگر در صندوق عقب اینگونه خودروها مثل خودروهای hatch back از بالا باز شود، معمولاً عضو این دسته بشمار می‌آیند و اگر مثل خودروهای sedan باز شود، عضو این گروه محسوب می‌شوند.

نکته: در Station و hatch backها دو فضـــای مجزا داریم (محفظه موتور و محفظه کابین) ولی در sedanها یک فضای دیگر هم اضافه می‌شود (محفظه بار).

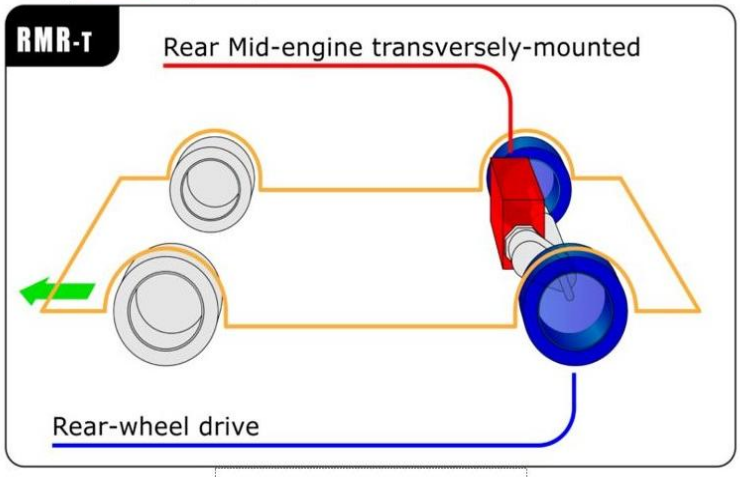
- خودروها را همچنین از نظر محل قرارگیری موتور و چرخ‌های محرک می‌توان طبقه‌بندی کرد.

جانمایی جرخ های محرک

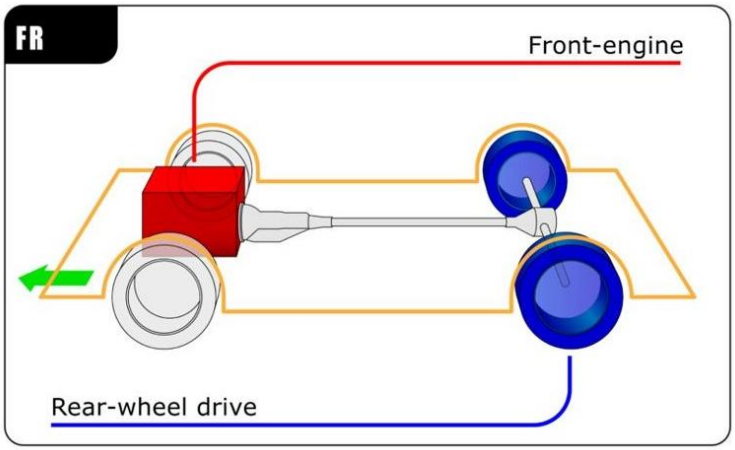
REAR-WHEEL DRIVE (RWD)

- Front-engine, rear-wheel drive (FR layout)
- Front mid-engine, rear-wheel drive (FMR layout)
- Rear mid-engine, rear-wheel drive (RMR layout)
- Rear engine, rear-wheel drive (RR layout)

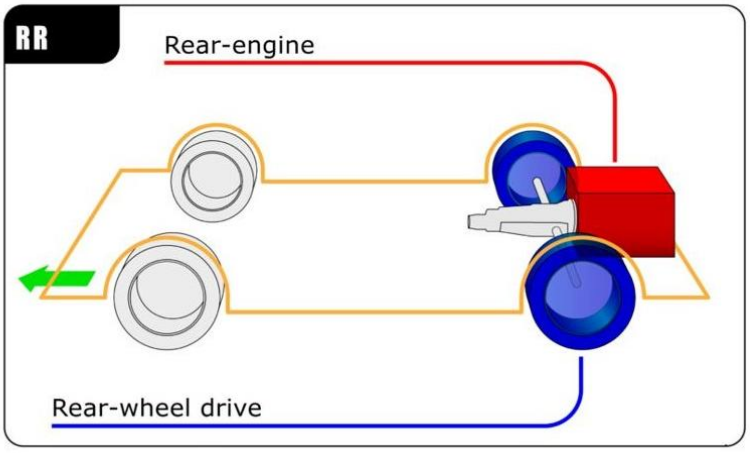
Rear mid-engine (Transversely Mounted), rear-wheel drive (RMR layout)



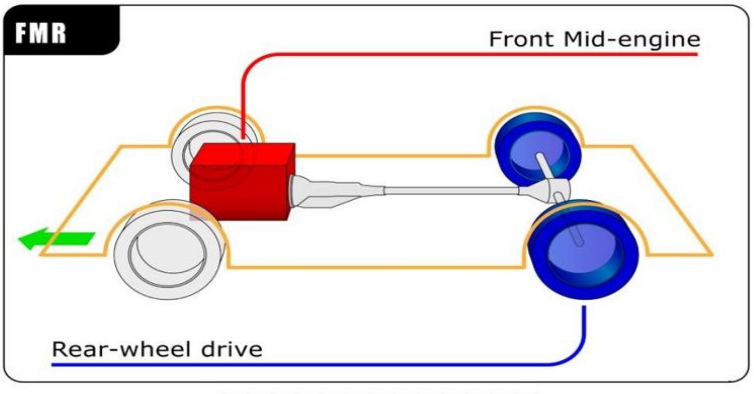
- Front-engine, rear-wheel drive (FR layout)



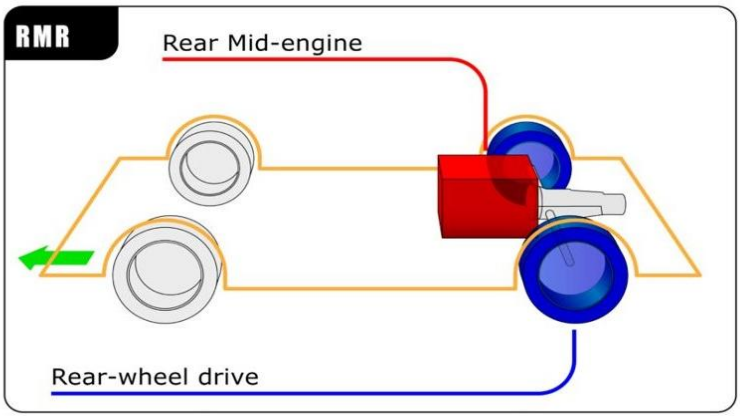
- Rear engine, rear-wheel drive (RR layout)



- Front mid-engine, rear-wheel drive (FMR layout)



- Rear mid-engine, rear-wheel drive (RMR layout)



عملاً بدنه را بگونه ای طراحی می‌کنند که وزن بیفتد روی محور جلو ⇐ برای بهتر هدایت کردن خودرو

عوامل مؤثر در انتخاب جانمایی موتور و چرخ‌های محرک در جلو یا عقب

- Application of the vehicle
- weight distribution
- handling characteristics
- packaging ⇒ اینکه موتور گیربکس و .... کجا قرار داشته باشند.
- complexity
- reliability
- cost

نکته: جانمایی استاندارد یا مرسوم، که بعنوان پایه بوده و در گذشته روی همه ی خودروها بکاربرده شده

⟵ موتور جلو و محرک عقب ⟵ چیدمان استاندارد

در جانمایی خودرو راستای قرارگیری موتور (طولی یا عرضی) نیز مهم است.

حالت خطی ⟵ ۴ سیلندر در جهت خودرو قرار داشته باشند.

جهت میل لنگ در جهت طول خودرو ⟵ موتور طولی قرار گرفته Longitudinal

جهت میل لنگ عمود بر طول خودرو ⟵ موتور عرضی قرار گرفته Transverse

دلیل زوج بودن تعداد سیلندرها ⇐برای بالانس کردن نیروهای دینامیکی

دغدغه‌های اصلی در طراحی خودرو:

-محیط زیست (مصرف سوخت، کاهش آلاینده‌ها، بازیافت، طول عمر، ...)

در مورد بازیافت: از موادی استفاده شود که راحت‌تر بازیافت شوند مثلاً از فلزات سنگین استفاده نشود.

در مورد مصرف سوخت: بیشتر به صورتMpg (mile per gallon) بیان می‌شود.

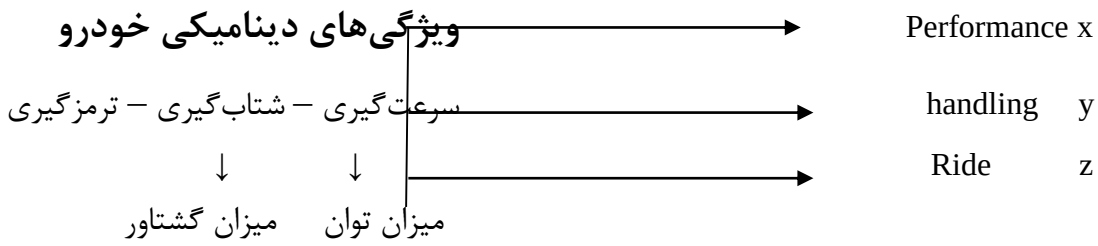
در هر ۱۰۰ Km چند Lit بنزین سوخت می‌شود. ← L/100 Km

هرچه کمتر سوخت کند بهتر است.

نکات: مصرف سوخت با وزن افزایش می‌یابد.

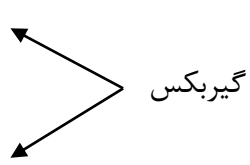
وزن بالاتر ← انرژی جنبش بیشتر ← خسارت در تصادفات بیشتر

درکشورهای خارجی ← هرچه وزن بیشتر ← مالیات بیشتر



نکته: گاهی موتور می‌تواند ۱۴۰ hp توان تولید کند اما با ا ستفاده از دینامومتر سر چرخ ها می‌بینیم که چرخ‌های خودرو ۱۰۰hp توان تولید می‌کنند که این اتلاف انرژی مربوط به گیربکس، صفحه کلاچ و ... است.

نکته: توربو شارژ ← یکپارچه با موتور← با استفاده از توان گازهای خروجی اگزوز، هوای ورودی موتور را متراکم می‌کند، لذا دمای آن بالاتر می‌رود (مثلاً اگر قبلاً دمای ورودی ۲۰° بوده الان ۶۰° می‌شود) و به تبع آن دمای گازهای حاصل از احتراق نیز ممکن است تا حدودی افزایش یابند.



-قوانین، الزامات و استانداردها ← ایمنی خیلی مهم است حتی اگر از نظر محیط زیستی و ویژگی‌های دینامیکی خوب باشد ولی باید ایمنی آن عالی باشد.

-مسائل فوری و اجتماعی ← ۱- قیمت ۲- مصرف سوخت ۳- زیبایی ۴- noise داخل کابین

نکته: خودروهای هیبریدی ← کارشان با برق است لذا مصرف سوختشان پایین است.

- فضا و جادار بودن، وزن

- استحکام مناسب اجزای شاسی و بدنه

نکته‌ای برای جمع‌بندی این مبحث:

تمام نیروها و intraction هایی که بین خودرو، راننده و جاده وجود دارد و تأثیر آنها روی performance، Ride و Handling :

داخل جزوه

نکته: در هنگام دور زدن ← شتاب خارج از مرکز به خودرو وارد می‌شود.

نکته: بالا بردن استحکام لزوماً نیاز نیست گاهی نیاز است که استحکام کم باشد.

طولی یا عرضی قرار گرفتن موتور:

این موضوع از نظر packaging بیشتر اثرگذار است مخصوصاً در خودروهای سواری، از نظر اثر ژیروسکوپی هم تأثیر دارد که موتور بصورت طولی قرار بگیرد مخصوصاً در سرعت‌های بالا که باز این خودش بستگی دارد، مخ صو صاً زمانی که خودرو تمایل به دوران حول محور y دارد در حین رفتن در م سیر x که این باعث ایجاد یک گشتاور ژیروسکوپی می‌شود. این قضیه در موتورسیکلت خیلی مهم است.

جانمایی یا قرارگیری موتور

آرایش اســتاندارد (متداول) این اســت که موتور جلو باشــد و چرخ‌های محرک عقب باشــند که غیر از این غیراستاندارد می‌شود.

Engine				
	F	F-RWD	F-FWD	4WD
	R	R-RWD	R-FWD	AWD
		R	F	

Drive Wheel

نکته: اگر موتور ← جلو ← تنفس بهتر – خنک‌کاری بهتر – هدایت کردن بهتر

یک حالت داریم که موتور جلو ولی متمایل به عقب ← باعث می شود که مرکز جرم ما را کمی به عقب‌تر منتقل کند ← Front mid Engine

که در اینصورت مرکز جرم موتور وسط خودرو قرار می‌گیرد اما در خودروهای سواری دقیقاً نمی‌تواند وسط باشد.

نکته: در خودروهای مسابقه‌ای ← بیشتر ما حالت موتور عقب متمایل به جلو داریم که این در خودروهای دو سرنشین بیشتر است.

نکته: خودرو ← جلو ← دقیقاً روی محور قرار دارد.

خصوصیات خودروهای Front Engine Rear Wheel Drive

که این خصوصیات برای Front Mid Engine هم هست.

۱- بخاطر انتقال مرکز ثقل خودرو به مرکز خودرو، فرمان‌پذیری بهتر می‌شـود که پایداری عرضـی خودرو عملاً بهتر می شود.

۲- فضای کافی برای سیستم تعلیق هم در جلو و هم در عقب وجود دارد.

۳- از فضای محفظه‌ی موتور استفاده می‌شود.

۴- توزیع وقت بصورت یکنواخت‌تری انجام می‌شود.

۵- بار روی محور محرک به اندازه‌ی کافی وجود دارد.

۶- شمای آیرودینامیکی مناسبی دارد.

۷- وجود میل گاردن که باعث افزایش وزن می شود و هم محدودیت فضا در زیر بدنه را ایجاد می‌کند ← معایب← روی وزن و performance اثر می‌گذارد.

در حالت Front Mid Engine ⇐ جلو فضا برای تجهیزات الکتریکی وجود داشته باشد.

۸- افت بازده یا راندمان(efficiency) قوای محرکه در اثر وجود میل گاردن

خصوصیات خودروهای R.RWD ⇐ فضای عقب بزرگتر از جلو می‌شود.

۱- نیروی رانش بیشتری ایجاد می‌شود.

۲- طراحی محور جلو ساده و به راحتی انجام می‌گیرد.

۳- noise و سروصدا کمتر

۴- پروفیل آیرودینامیکی مناسب است حتی از حالت استاندارد هم نیز بهتر است.

نکته: سر خودرو بیشتر پایین بیاید بهتر است ← هرچه وزن بیشتر به کابین وارد شود ← پایین‌تر از ته خودرو ← سر خودرو

Aerodynamic profile

سر خودرو کمی پایین‌تر ⇒ بهتر از ته خودرو

نکته: امروزه خودروها ← F.FWD

نکته: اگر موتور ← Longitudinal ← مرکز ثقل را خراب می‌کند اما از نظر بحث ژیروسکوپی بهتر است و اگر متمایل به وسط باشد باعث می‌شود که جا بهتر باشد.

خصوصیات خودروهای F.FWD ⇐ فضای جلو بزرگتر از عقب می‌شود.

۱- توزیع وزن روی چرخ‌های محرک منجر به نیروی traction خوبی می‌شود.

۲- نیاز به میل گاردن نداریم ← وزن خودرو کاهش پیدا می‌کند. درنتیجه طراحی کف خودرو ساده‌تر است ← معایب قبلی فواید الان است.

۳- Trans – axel ← gear + differential ⇐ بصورت متمرکز طراحی می‌شوند.

نکته: در هنگام دور زدن در پیچ

$$\begin{cases} F.FWD \rightarrow under\,steer \\ F.RWD \rightarrow over\,steer \end{cases}$$ در اینصورت طراحی محور جلو خیلی پیچیده است, طراحی Aeroprofile اشکال دارد ← افزایش وزن ← ته خودرو پایین می‌رود.

۴WD ← عمدتاً موتور جلو است که باعث تنفس بهتر موتور می‌شود و در 4WDها دیگر نیاز به میل گاردن نداریم. مرسوم نیست که موتور عقب قرار بگیرد.

	F.RWD		F.FWD		R.RWD	
	F	R	F	R	F	R
بدون بار و سرنشین	۵۴	۴۶	۶۱	۳۹	۴۰	۶۰
۲ سرنشین	۵۴	۴۶	۶۰	۴۰	۴۲	۵۸
۴ سرنشین	۵۰	۵۰	۵۵	۴۵	۴۰	۶۰
کامل	۴۳	۵۷	۴۹	۵۱	۴۰	۶۰
بار از جلو برداشته می‌شود						

Individual Wheel Drive

(معمولاً در خودروهای الکتریکی):

در موتورهای الکتریکی از یک خانواده، معمولاً توان موتور با وزن آن متناسب است.

توان 100KW ← (بین ۴ چرخ تقسیم می شود) یک موتور 25 KW در هر چرخ قرار می گیرد. حسن آن این است که با کنترل هرکدام از این چرخ‌ها می توان به خودرو فرمان داد یا پایداری خودرو را کنترل نمود. به این ترتیب، کنترل پذیری خودرو به طور چشم گیری ارتقاء می یابد.