فصل سوم

کار مکانیکی

هدف‌های رفتاری: پس از پایان این فصل از فراگیر انتظار می‌رود :

۱ــ کار مکانیکی را تعریف کند ؛

۲ــ کار مکانیکی را محاسبه نماید ؛

۳ــ توان مکانیکی ماشین‌آلات را محاسبه کند ؛

۴ــ راندمان را تعریف نماید ؛

۵ــ راندمان ماشین‌آلات را محاسبه کند ؛

۶ــ رابطه توان را با گشتاور نیروی محیطی تعیین کند ؛

۷ــ محاسبات مربوط به باربرهای ساده (ماشین‌های ساده) را انجام دهد ؛

۸ــ اصطکاک را تعریف کند ؛

۹ــ انواع اصطکاک را بیان کند ؛

۱۰ــ اصطکاک لغزشی را محاسبه نماید ؛

۱۱ــ اصطکاک غلتشی را محاسبه کند.

زمان تدریس : ۱۲ ساعت

مقدمه

در گفتگوهای روزانه کلمه‌ی «کار» تقریباً به یک نوع فعالیت بدنی یا فکری نسبت داده می‌شود، اما در دانش فیزیک ــ مکانیک، کار معنای ویژه‌ای دارد و هنگامی انجام می‌گیرد که نیرویی سبب حرکت جسمی شود.

آیا تاکنون به شخصی که الواری را رنده می‌کند، نگاه کرده‌اید؟ حال به این پرسش‌ها فکر کنید :

ــ چه نیرویی باید به الوار وارد شود تا الوار روی صفحه‌ی دستگاه به حرکت درآید و از نظر

علم فیزیک چه عملی انجام می‌شود؟

ــ برای به حرکت درآوردن توپی دستگاه چه انرژی مصرف شده و از کجا پدید می‌آید؟

ــ آیا مرکز مبدل انرژی یا الکتروموتور، توانایی انجام این کار را تا آخرین مرحله خواهد داشت؟

ــ آیا این دستگاه مبدل انرژی بازده یا راندمان مطلوبی دارد و یا از نظر اقتصادی به صرفه است؟

ــ در هنگام تبدیل انرژی چه مقداری از توان دستگاه صرف اصطکاک و یا دیگر مقاومت‌ها می‌شود؟

ــ آیا اصطکاک همیشه باعث کاهش توان دستگاه می‌شود؟ آیا اصطکاک همیشه عمل منفی انجام می‌دهد؟

پیش از آن که به بررسی این پرسش‌ها و پاسخ دادن به آن‌ها بپردازید باید مطمئن شوید که مفهوم فیزیکی کلمات کار، توان، راندمان و اصطکاک را به‌درستی می‌دانید. شما هنرجویان در سال‌های پیش با این کلمات به گونه‌ای ساده و ابتدایی آشنا شدید، امّا این فصل را با دیدی که جنبه علمی، فنی و کاربردی بیشتری دارد دنبال خواهید کرد.

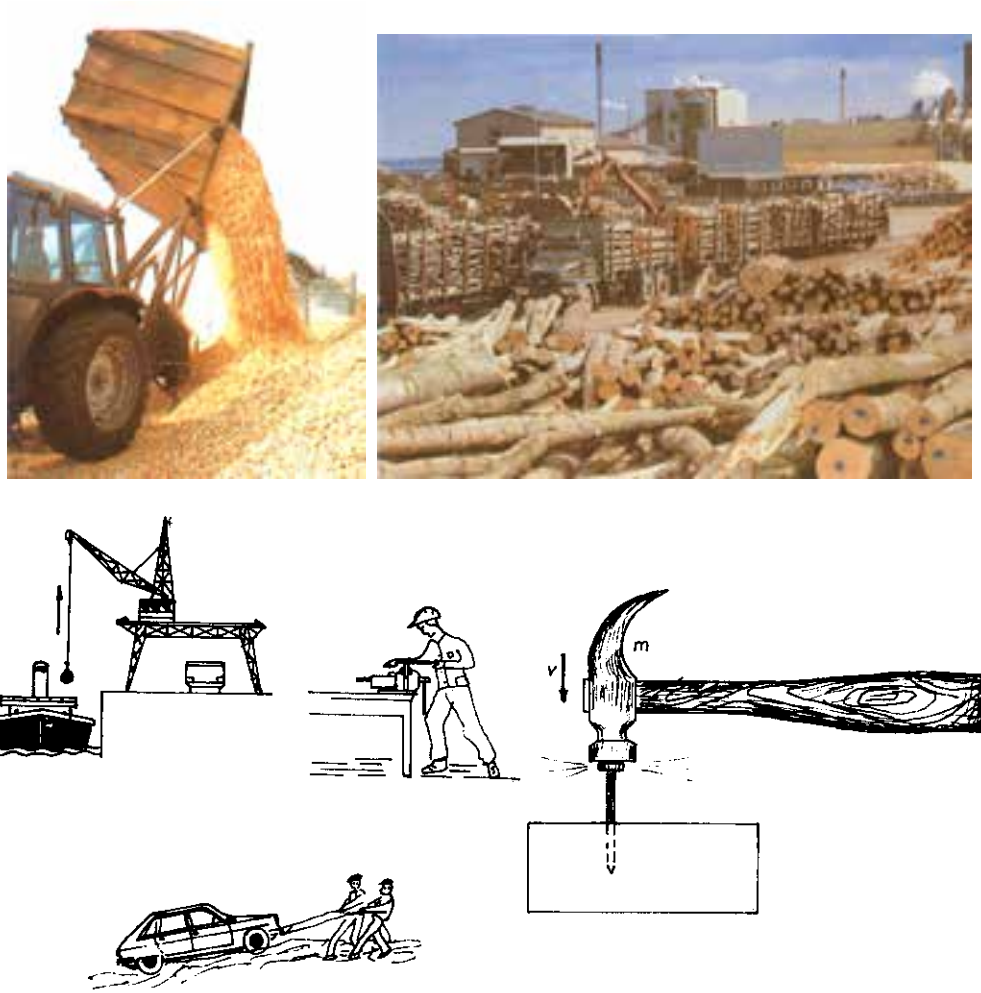
۳ــ کار مکانیکی

۱ــ۳ــ تعریف کار مکانیکی

در صورتی که نیرویی بر جسمی وارد شود و آن جسم به حرکت درآید می‌گوییم «کار» انجام گرفته است. مثلاً وقتی که تخته‌ای را از روی زمین برمی‌داریم و آن‌را بالا می‌بریم تا روی میز کار بگذاریم نیروی مساوی و مخالف جهت نیروی جاذبه زمین بر آن وارد می‌سازیم و آگاهیم که برای جابه‌جا کردن آن تخته، «انرژی» مصرف کرده‌ایم و کاری انجام داده‌ایم، اما هنگامی که تلاش می‌کنیم تا گرده بینه بزرگی را جابه‌جا کنیم و موفق نمی‌شویم، گرچه انرژی مصرف می‌کنیم، امّا کاری انجام نمی‌دهیم ؛ بنابراین کار وقتی انجام می‌شود که نیرویی سبب جابه‌جا شدن نقطه‌ی اثر خود شود ؛ بنابراین، توجه به این امر، مهم است که اگر نیرویی نتواند نقطه‌ی اثر خود را جابه‌جا کند کار صورت نمی‌گیرد.

اغلب، برای انجام دادن کار باید بر یک نیروی مقاوم غلبه کرد. این نیروی مقاوم ممکن است، نیروی جاذبه هنگام بالا بردن یک وزنه باشد یا نیروی اصطکاک هنگام کشیدن یا راندن یک جسم

برروی یک سطح یا نیروهای چسبندگی و پیوستگی بین مولکول‌ها هنگام جدا کردن دو جسم از یکدیگر باشد ؛ همچنین اعمالی مانند شکستن و پاره کردن، سوهان زدن، اره کردن یک جسم و نظایر آن.



شکل ۱ــ۳ــ اشکال مختلف کار

۱ــ۱ــ۳ــ محاسبه کار مکانیکی: بنابرآنچه گفته شد، دو عامل در اندازه‌ی کار مؤثر است : یکی نیرو و دیگری اندازه‌ی جابه‌جایی نقطه اثر نیرو و بنا به تعریف، کار برابر است با حاصل ضرب نیرو دراندازه‌ی جابه‌جایی نقطه‌ی اثر نیرو در راستایی که نیرو اثر می‌کند.

تغییر مکان . نیرو = کار مکانیکی

$$W = F \cdot S$$

$$1Nm = 1j$$

علایم اختصاری:

F : نیرو بر حسب نیوتن

S : تغییر مکان بر حسب متر

W : کار بر حسب نیوتن متر (ژول)

یک ژول مقدار کاری است که بتواند جسمی را که نیروی وزن آن برابر یک نیوتن می‌باشد به اندازه‌ی یک متر از زمین بلند کند.

عامل به وجود آورنده‌ی کار را «انرژی» گویند که به صورت‌های مختلف یافت می‌شود، یعنی :

الف) انرژی مکانیکی ؛

ب) انرژی حرارتی ؛

ج) انرژی الکتریکی.

واحد سنجش انرژی حرارتی و مکانیکی ژول (J) و یا کیلوژول (kJ) است. برای سنجش کار الکتریکی از واحد سنجش وات ثانیه (Ws) یا کیلو وات ساعت (kWh) استفاده می‌کنیم.

چون انرژی‌های موجود در طبیعت به یکدیگر تبدیل می‌گردند، از این‌رو واحدهای انرژی را به نحوی انتخاب می‌کنند که در عمل معادل یکدیگر باشند تا بتوان به‌سهولت آن‌ها را باهم مقایسه کرد.

$$1Nm = 1J = 1Ws$$

$$1kWh = ۳۶۰۰۰۰۰Nm = ۳۶۰۰kJ$$

چون در بعضی از وسایل حرارتی واحد کالری و یا کیلوکالری به کار می‌برند، از این‌رو از یک ضریب تبدیل استفاده می‌کنیم.

$$1J = ۰/۲۴cal$$
$$1cal = ۴/۲J$$

مثال نمونه: کار انجام شده با یک جرثقیل برای بالا بردن تخته‌های بریده شده تا ارتفاع ۴ متری معادل ۶۴kJ است. اگر هر تخته ۱۶۰ نیوتن وزن داشته باشد هربار جرثقیل چند تخته را می‌تواند جابه‌جا نماید؟

جواب:

$W = F.S \quad F = \frac{W}{S}$

$F = \frac{۶۴۰۰۰J}{۴m} \quad F = ۱۶۰۰۰\ N$

تعداد تخته‌ها $n = ۱۶۰۰۰ \div ۱۶۰ = ۱۰۰$ عدد

تمرین

۱ــ برای انتقال یک دستگاه ارّه تا فاصله‌ی ۲ متری، نیروی افقی معادل ۲۵۰ نیوتن لازم است. محاسبه کنید چند ژول کار انجام گرفته است؟

۲ــ برای جابه‌جایی پمپ باد در سطح کارگاه به وسیله طنابی که با سطح افق زاویه‌ی ۴۵ دارد، ۵۰ نیوتن نیرو لازم است. پس از ۱۰ متر جابه‌جایی چقدر کار انجام شده است؟

۳ــ حداکثر کار انجام شده یک لیفتراک مطابق شکل ۲ــ۳ برای بالا بردن پالت‌های روکش تا ارتفاع ۱۵۰ سانتی‌متری معادل ۲۵۰۰۰J می‌باشد، اگر جرم هر پالت روکش ۸۰۰ کیلوگرم باشد، لیفتراک هربار چند پالت را می‌تواند جابه‌جا کند؟

شکل ۲ــ۳ــ لیفتراک

۲ــ ۳ــ توان مکانیکی

اغلب لازم می‌شود که علاوه برتعیین کار انجام شده، بدانیم کار در چه زمانی انجام گرفته است ؛ بنابراین، مقدار کار انجام شده رادر واحد زمان «توان» گویند.

برای تعیین توان متوسط یک دستگاه یا یک ماشین کافی است کاری را که دستگاه انجام می‌دهد بر زمان انجام آن تقسیم کنیم :

روابط :

$$P = \frac{W}{T}$$

$$W = F \cdot S$$

$$V = \frac{s}{T}$$

$$P = F \cdot V$$

علایم اختصاری:

P : توان متوسط دستگاه برحسب وات

W : کار انجام شده برحسب ژول

T : زمان برحسب ثانیه

F : نیروی وارد بر جسم برحسب نیوتن

V : سرعت برحسب متر برثانیه

واحد توان از روابط فوق برحسب Nm/s به دست می‌آید که در دستگاه بین‌المللی واحدها «وات» است و با علامت اختصاری W نمایش داده می شود. (یک وات برابر یک ژول کار است که در مدت یک ثانیه انجام گرفته است.)

$$۱Nm/s = ۱W = ۱J/s$$
$$۱J/s = ۰/۲۴cal/s$$

برای سنجش توان مکانیکی قبلاً از واحد دیگری به نام «اسب بخار» (P_S) استفاده می‌شد که امروزه متداول نیست، بلکه توان مکانیکی را بر حسب وات و یا کیلووات می‌سنجند و برای تبدیل کیلووات به اسب بخار و برعکس، از این ضرایب تبدیل می‌توان استفاده کرد :

$$۱kW = ۱/۳۶P_S$$
$$۱P_S = ۰/۷۳۶kW$$

مثال نمونه«۱»: توان موتور پمپی که ۲۰۰ کیلوگرم آب را در ۱۰ ثانیه به ارتفاع ۶ متر بالا می‌برد (به ازای $g = ۹/۸ m/s^۲$) بر حسب کیلووات چنین حساب می‌شود :

$$F = ۲۰۰kgf = ۲۰۰ . ۹/۸N = ۱۹۶۰N$$

$$W = F . S$$

$$W = ۱۹۶۰ . ۶ = ۱۱۷۶۰J$$

$$P = \frac{W}{T} . \quad P = \frac{۱۱۷۶۰}{۱۰} = ۱۱۷۶W = ۱/۱۷۶kW$$

مثال نمونه «۲»: یک موتور مکنده درهر دقیقه یک متر مکعب خرده چوب (چیپس) مطابق شکل ۳ــ ۳ تا ارتفاع ۱۲ متری به درون سیلوی ذخیره انتقال می‌دهد. اگر جرم هر متر مکعب چیپس ۲۰۰ کیلوگرم باشد، توان موتور فوق را بر حسب نیوتن متر بر ثانیه، کیلووات و اسب بخار حساب کنید :

$$m = ۲۰۰kg$$

$$F = ۲۰۰ . ۱۰ = ۲۰۰۰N$$

$$P = \frac{F . S}{t} = \frac{۲۰۰۰ . ۱۲}{۱ . ۶۰} = ۴۰۰Nm/s$$

$$۱Nm/s = ۱W$$

$$P_{KW} = \frac{۴۰۰}{۱۰۰۰} = ۰/۴kW$$

$$P_{P_S} = ۰/۴ . ۱/۳۶ = ۰/۵۴۴P_s$$

شکل ۳ــ۳ــ خرده‌چوب (چیپس) دپوشده

تمرین

۱ــ در یک دستگاه اگر تعداد دوران چرخ تسمه $n = ۷۲۰\ 1/min$ و قطر چرخ تسمه $d = ۲۰cm$ و نیروی کشش تسمه $F = ۳۶۰N$ باشد توان انتقالی را حساب کنید.

۲ــ موتور پمپی در مدت ۱۰ ثانیه ۲۰۰ لیتر آب[۱] را ۱۰ متر بالا می‌برد، توان موتور پمپ را برحسب قوه اسب بخار به دست آورید.

۳ــ گرده بینه‌ای با قطر متوسط ۶۵ سانتی‌متر و به طول ۷ متر و جرم ویژه[۲] ۰/۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب با یک جرثقیل ۱۰ متر بالا برده می شود، این موارد را محاسبه کنید :

الف) کار انجام شده،

ب) توان مصرفی (در صورتی که زمان بالا بردن گرده بینه یک دقیقه باشد).

۴ــ تخته‌ای را به ابعاد $۲/۱m \times ۲۰cm \times ۵۰mm$ از روی زمین بلند کرده روی صفحه ماشین رنده قرار می‌دهیم. اگر جرم ویژه این گونه ۰/۶۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب و زمان انجام کار ۱۰ ثانیه و ارتفاع دستگاه ۷۰ سانتی‌متر باشد، کار انجام شده و توان مصرفی چقدر است؟

۵ــ کار مکانیکی و توان انجام شده دستگاه جرثقیل را مطابق شکل ۴ــ۳ محاسبه کنید ؛ در صورتی که :

- جرم متوسط هر گرده‌بینه ۸۰ کیلوگرم ؛
- ارتفاع حمل ۲/۵ متر ؛
- زمان انجام کار ۴۰ ثانیه است.

شکل ۴ــ۳ــ جرثقیل حمل گرده‌بینه

---

۱ ــ چگالی آب $\rho = ۱۰۰۰ Kg/m^3$

۲ــ $p = \frac{m}{V}$

۳ــ۳ــ راندمان

در ماشین‌های مبدل انرژی و یا در وسایل انتقال حرکت، مقداری از توان گرفته شده صرف برطرف کردن عواملی مثل اصطکاک، مقاومت الکتریکی و غیره می‌شود یا بخشی از آن تبدیل به حرارت می‌گردد و بقیه را به صورت توان بازده ــ که آن‌را «توان مفید» نیز می‌گویند ــ پس می‌دهند (شکل ۵ــ۳).

شکل ۵ــ۳ــ افزاینده، کاهنده

بنابراین در کلیه این گونه وسایل، توان بازده کمتر از توان گرفته شده است و نسبت توان بازده را به توان گرفته شده «راندمان» یا «ضریب بهره» گویند.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

علایم اختصاری:

η[1] : راندمان یا ضریب بهره

P_1 : توان گرفته شده

P_2 : توان بازده (توان مفید)

در این رابطه می‌توان مقدار توان را بر حسب هریک از واحدهای توان مکانیکی، توان الکتریکی و حرارتی قرار داد، اما باید توجه داشت که واحد هردو از یک جنس باشد.

مسأله نمونه «۱»: راندمان الکتروموتوری را حساب کنید که توان گرفته شده آن از شبکه برق معادل $P_1 = 4kW$ و توان بازده آن $P_2 = 3kW$ باشد.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{3}{4} = 0/75 = \%75$$

مسأله نمونه «۲»: در دستگاه انتقال حرکت شکل ۶ــ۳ که از یک الکتروموتور و یک‌جعبه‌دنده

---

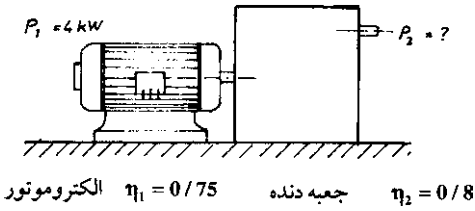
۱ ــ اِتا (حرف یونانی)

تشکیل شده است این موارد را حساب کنید :

الف) توان بازده موتور،

ب) توان بازده جعبه دنده،

ج) راندمان کل دستگاه.



شکل ۶ــ۳ ــ دستگاه انتقال حرکت

الف) $\eta_M = \frac{P_{2M}}{P_{1M}}$

$P_{2M} = \eta_M \times P_{1M} = ۰/۷۵ \times ۴ = ۳kW$

ب) $P_{2M} = P_{1G}$

$\eta_G = \frac{P_{2G}}{P_{1G}} \Rightarrow P_{2G} = \eta_G \times P_{1G} = ۰/۸ \times ۳ = ۲/۴kW$

$\eta = \frac{P_{2G}}{P_{1M}} = \frac{۲/۴}{۴} = ۰/۶۰$

یا

$\eta = \eta_M \times \eta_G = ۰/۷۵ \times ۰/۸ = ۰/۶۰$

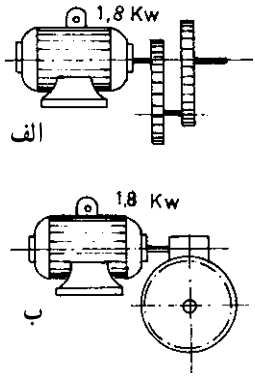
بنابراین، راندمان کل یک دستگاه برابر حاصلضرب راندمان‌های موجود در آن است.

$$\eta = \eta_۱ \times \eta_۲ \times \ldots$$

و از رابطه $\eta = \frac{P_۲}{P_۱}$ نتیجه می‌گیریم که راندمان هر دستگاهی همیشه کوچکتر از یک است، و هردستگاهی که راندمان آن به عدد یک نزدیکتر باشد از نظر اقتصادی باصرفه‌تر است.

تمرین

۱ــ توان الکتروموتورهای مطابق شکل ۷ــ۳، ۱/۸ کیلووات است. حساب کنید توان بازده محور متحرک هر یک را در صورتی که راندمان چرخ دنده ساده $\eta = ۰/۹۵$ و راندمان حلزون و چرخ حلزون $\eta = ۰/۶۵$ باشد.

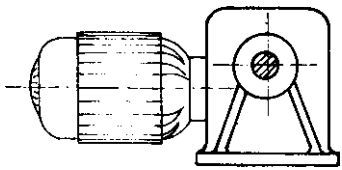


شکل ۷ــ۳

۲ــ توان گرفته شده الکتروموتور دستگاهی مطابق شکل ۸ــ۳، $P_1E = ۰/۹۱$ کیلووات و راندمان آن $\eta_E = ۰/۹۰$ می‌باشد. اگر این توان از طریق حلزون و چرخ حلزونی با راندمان $\eta = ۰/۸۰$ منتقل شود، این موارد را حساب کنید.

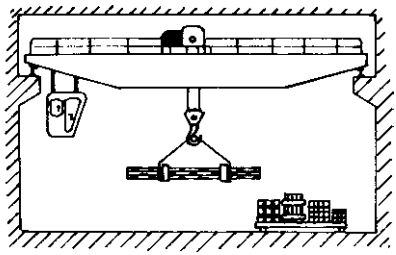
الف) راندمان کل دستگاه،

ب) توان محور متحرک.



شکل ۸ ــ۳

۳ــ نیروی موجود در قلاب جرثقیلی مطابق شکل ۹ــ۳ $F = ۰/۵MN$ بوده و سرعت حرکت بار $V = ۳/۳ \frac{m}{min}$ و راندمان جرثقیل $\eta = ۰/۸۰$ می‌باشد. توان لازم را بر حسب کیلووات حساب کنید.

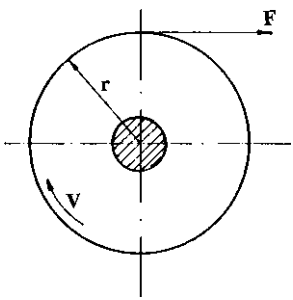


شکل ۹ــ۳

۴ــ۳ــ تعیین نیروی محیطی و رابطه توان با گشتاور

در بعضی از موارد لازم می‌شود که با داشتن توان، گشتاور انتقال‌پذیر دستگاه محاسبه شود یا آن که با داشتن تعداد دَوَران و نیروی محیطی و توان بخواهیم قطر چرخ تسمه و یا چرخ دنده و یا قطر محوری را محاسبه کنیم (شکل ۱۰ ــ۳).

رابطه موجود بین عوامل یاد شده بدین شرح محاسبه می‌شود :



شکل ۱۰ــ۳

علایم اختصاری:

F : نیروی محیطی بر حسب نیوتن

r : شعاع چرخ یا محور برحسب متر

M : گشتاور چرخ یا محور برحسب نیوتن متر.

n : تعداد دوران چرخ یا محور برحسب دور در هر دقیقه.

V : سرعت محیطی چرخ یا محور بر حسب متر بر ثانیه.

رابطه توان برحسب نیرو و سرعت برابراست با : $\boxed{P = F \times V}$

اگر در این فرمول به جای سرعت محیطی مقدار آن را قرار دهیم، خواهیم داشت :

$$V = \frac{۲ \times r \times \pi \times n}{۶۰}$$

$$P = F \times V \Rightarrow P = F \times \frac{۲ \times r \times \pi \times n}{۶۰} \Rightarrow P = \frac{F \times r \times n}{۱} \times \frac{۲ \times \pi}{۶۰}$$

$$P = \frac{F \times r \times n}{۱} \times \frac{۱}{۹/۵۵۵}$$

$$P = \frac{F \times r \times n}{۹/۵۵۵} \text{ Nm/s یا } W$$

توان بر حسب کیلووات برابر است با $\boxed{P_{(KW)} = \frac{F \times r \times n}{۹۵۵۵}}$

اگر دررابطه یادشده به جای $F \times r$ مقدار آن، یعنی گشتاور را قرار دهیم خواهیم داشت :

$$\boxed{P_{(KW)} = \frac{M \times n}{۹۵۵۵}} \Rightarrow \boxed{M = F \times r = ۹۵۵۵ \frac{P_{(KW)}}{n}}$$

مسأله نمونه: الکتروموتور دستگاهی که توان بازده آن ۵ کیلووات است دارای تعداد دوران $n = ۱۴۴۰ \ ۱/\min$ است. حساب کنید : اولاً، گشتاوری را که به‌وسیله آن می‌توان‌منتقل کرد ؛ ثانیاً، اگر نیروی کشش لازم در تسمه‌ای که به وسیله الکتروموتور می‌گردد $F = ۳۳۱/۷N$ باشد قطر چرخ تسمه آن را حساب کنید.

$$M = \frac{P_{(KW)} \times ۹۵۵۵}{n} = \frac{۵ \times ۹۵۵۵}{۱۴۴۰} = ۳۳/۱۷Nm$$

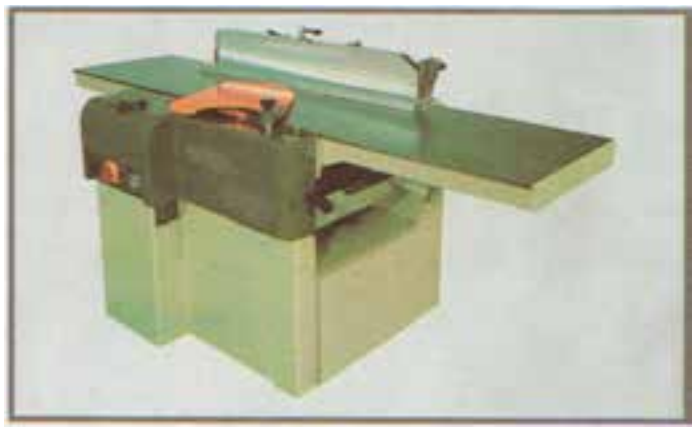
$$M = F \times r \Rightarrow r = \frac{M}{F} = \frac{۳۳/۱۷}{۳۳۱/۷} = ۰/۱m$$

$$d = ۲ \times r = ۲ \times ۰/۱ = ۰/۲m = ۲۰۰mm$$

تمرین

۱ــ یک اره مجموعه‌ای به قطر $D = ۳۶۰mm$ به وسیله الکتروموتوری که توان بازده آن ۲/۲ کیلووات و تعداد دوران آن ۲۸۲۰ دور در هر دقیقه است، کار می‌کند، نیروی محیطی اره را حساب کنید.

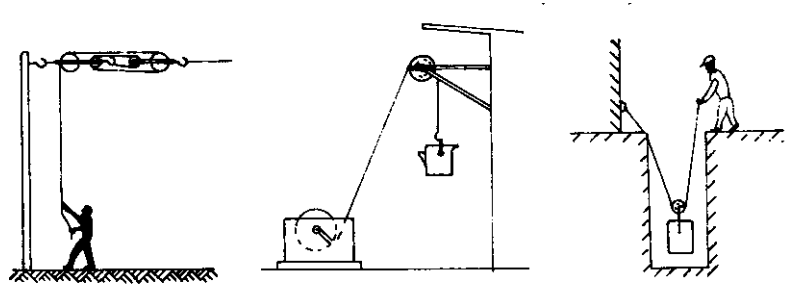
۲ــ الکتروموتور ماشین کف‌رندی، مطابق شکل ۱۱ــ۳ با ۳۰۰۰ دور در هر دقیقه، توانی معادل $P_۱ = ۳/۵kW$ از شبکه برق می‌گیرد، اگر راندمان الکتروموتور $_E = ۰/۹۰$. و راندمان ماشین $_M = ۰/۷$. باشد، نیروی محیطی را حساب کنید اگر قطر پولی $d = ۱۲۰mm$ باشد.



شکل ۱۱ــ۳ــ ماشین کف‌رند

۵ــ۳ــ بالابرهای ساده (ماشین‌های ساده)

تعریف: ماشین‌های ساده، وسایلی هستند که بدون تغییر در مقدار کار، انجام آن را آسان نموده انسان را قادر می سازد با نیروی کم، اجسام سنگین‌تری را جابه‌جا نماید ؛ مانند : قرقره‌ها، جرثقیل‌ها و غیره (شکل ۱۲ــ۳).



جرثقیل　　قرقره ثابت　　قرقره‌متحرک

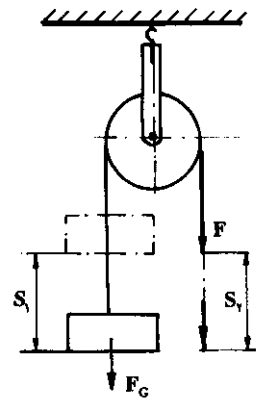
شکل ۱۲ــ۳ــ انواع بالابرهای ساده

۱ــ ۵ ــ۳ــ قرقره‌ها: برای حمل بار از قرقره‌ها به دو روش می‌توان استفاده کرد ؛

الف) قرقره‌های ثابت: این نوع قرقره‌ها در مقدار نیرو تغییری ایجاد نکرده فقط جهت نیرو را عوض می‌کنند (شکل ۱۳ــ ۳).

$S_۲ = S_۱$

$F = F_G$



شکل ۱۳ــ۳

علایم اختصاری:

$S_۱$: مقدار جابه‌جایی بار (جابه‌جایی حمل شونده)

$S_۲$: مقدار جابه‌جایی که باید انجام داد (جابه‌جایی حمل کننده)

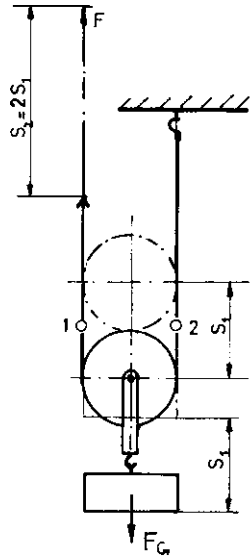
F : نیروی حمل کننده (نیرویی که باید اعمال شود تا بار جابه‌جا شود)

F_G : وزن نیروی بار

ب) قرقره‌های متحرک: این قرقره‌ها همراه بار تغییرمکان پیدا کرده در مقدار نیرو تغییری ایجاد می‌کنند (شکل ۱۴ــ۳).

$S_۲ = ۲S_۱$

$F = \frac{F_G}{۲}$

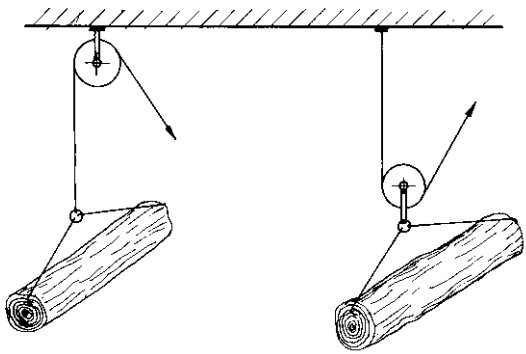


شکل ۱۴ــ۳

مسأله نمونه: یک الوار به وزن $F_G = ۱۲۰۰N$ را می‌خواهیم به اندازه ۸۰ سانتی‌متر از زمین بلند کرده روی دستگاه اره رام قرار دهیم. نیروی لازم و مقدار تغییر مکان زنجیر را در این دو مورد حساب کنید (شکل ۱۵ــ۳).

الف) اگر از قرقره ثابت استفاده شود.

ب) اگر از قرقره متحرک استفاده شود.



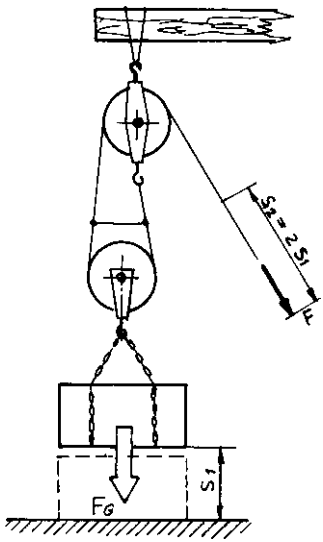
شکل ۱۵ــ۳ــ قرقره ساده و متحرک

حل:

الف) $F = F_G = ۱۲۰۰N$ و $S_۲ = S_۱ = ۸۰cm$

ب) $F = \frac{F_G}{۲} = \frac{۱۲۰۰}{۲} = ۶۰۰N$ و $S_۲ = ۲S_۱$. $S_۲ = ۲ . ۸۰ = ۱۶۰cm$

۲ــ۵ــ۳ــ جرثقیل‌های قرقره‌دار: برای این که بتوان با نیروی کم بارهای بسیار سنگینی را بلند کرد، از جرثقیل‌های مرکبی ــ که در ساختمان آن‌ها تعدادی قرقره ثابت و متحرک به کار رفته است ــ استفاده می‌گردد (شکل ۱۶ــ۳).



شکل ۱۶ــ۳

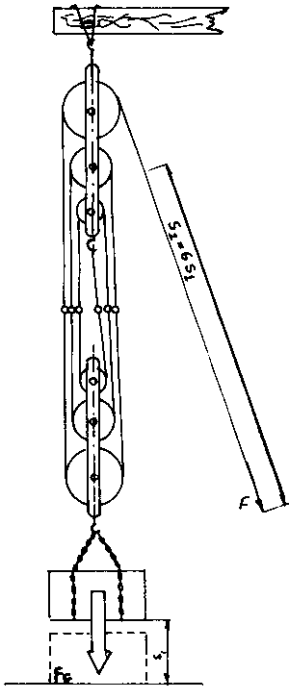
دوحالت کلی برای این نوع جرثقیل‌ها وجود دارد :

الف) چند قرقره ثابت و متحرک با تعداد مساوی (شکل ۱۷ــ۳)،

$$S_۲ = nS_۱$$

$$F = \frac{F_G}{n}$$

n = تعداد کل قرقره‌ها (ثابت و متحرک)

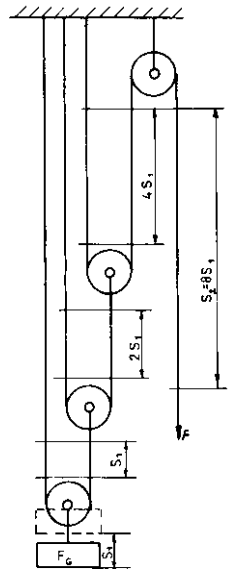


شکل ۱۷ــ۳ــ چند قرقره ثابت و متحرک با تعداد مساوی

ب) چند قرقره متحرک و یک قرقره ثابت (شکل ۱۸ــ۳).

$$S_۲ = ۲^{(n.\,۱)} \cdot S_۱$$

$$F = \frac{F_G}{۲^{(n.\,۱)}}$$



شکل ۱۸ــ۳ــ چند قرقره متحرک و یک قرقره ثابت

مثال ۱: برای شکل ۱۷ــ۳ محاسبه نمایید، اگر یک بار ۳۰۰ کیلوگرمی را بخواهیم ۲ متر بالا ببریم، الف) حداقل چه نیرویی را باید وارد نماییم. ب) چقدر ریسمان را باید بکشیم.

الف) $F = \frac{F_G}{n}$. $F = \frac{۳۰۰۰}{۶} = ۵۰۰N$

ب) $S_۲ = nS_۱$. $S_۲ = ۶(۲) = ۱۲m$

مثال ۲: اگر یک بار ۳۰۰ کیلوگرمی را بخواهیم با استفاده از سیستم شکل ۱۸ــ۳ ، ۲ متر بالا ببریم الف) حداقل چه نیرویی را باید وارد نماییم؟ ب) چقدر ریسمان را باید بکشیم؟

الف) $F = \frac{F_G}{۲^{n.۱}}$. $F = \frac{۳۰۰۰}{۸} = ۳۷۵N$

ب) $S_۲ = ۲^{(n.۱)}$. $S_۱$. $S_۲ = ۸(۲) = ۱۶m$

تمرین

۱ــ خرپایی از جنس LVL[۱] مطابق شکل ۱۹ــ۳ به جرم ۵۰۰kg را باید تا ارتفاع ۸ متری از زمین بلند کنیم. حال، این موارد را حساب کنید :

شکل ۱۹ــ۳

الف) مقدار جابه‌جایی و نیروی لازم اگر از یک قرقره متحرک استفاده شود.

ب) مقدار جابه‌جایی و نیروی لازم اگر از یک قرقره متحرک و یک قرقره ثابت استفاده شود.

ج) کار انجام شده در هر دو مورد یاد شده.

۲ــ برای بالا بردن باری به جرم یک تن فقط توانایی به کار بردن ۲۵۰۰ نیوتن نیرو وجود دارد.

۱ــ Laminated Veneer Lumber

تعداد قرقره‌های مورد نیاز و نسبت جابه‌جایی ($\frac{S_2}{S_1}$) را دراین دو حالت به دست آورید :

الف) از چند قرقره ثابت و متحرک به طور مساوی استفاده شود.

ب) از یک قرقره ثابت و چند قرقره متحرک استفاده شود.

۳ــ برای بالا بردن باری به جرم ۱۲۰۰ کیلوگرم در ارتفاع ۵ متری، اگر از چهار جفت قرقره ثابت و متحرک استفاده شود، چه نیرویی (F) و چه مقدار جابه‌جایی (S_2) لازم است؟ و اگر برای هرمتر جابه‌جایی (S_2) ۱۰ ثانیه وقت لازم باشد توان مکانیکی دستگاه را به دست آورید.

۴ــ برای تعمیر الکتروموتور دستگاهی می‌خواهیم آن را از زمین بلند کنیم. اگر از بالابری که یک قرقره ثابت و سه قرقره متحرک دارد، استفاده نماییم، چه نیرویی باید به دستگاه وارد شود؟ (در صورتی که جرم الکتروموتور ۶۰ کیلوگرم باشد.)

۵ــ درتمرین شماره ۲ اگر لازم باشد مقدار بار، ۳ متر بلند شود (S_1) و برای هر متر جابه‌جایی (S_2) ۲۰ ثانیه وقت لازم باشد، توان مکانیکی باربرها را در هر دو حالت حساب کنید.

۶ــ۳ــ اصطکاک

هرگاه جسمی بر روی سطح جسم دیگری بلغزد هریک از دو سطح بریکدیگر نیرویی وارد می‌کند که اولاً : این نیرو در امتداد سطح است، ثانیاً : مانع حرکت دو جسم بر روی یکدیگر می‌شود. این نیرو را«نیروی اصطکاک» می‌نامند ؛ مثلاً اگر جسمی برروی میزی به طرف چپ به حرکت درآید نیروی اصطکاک وارد بر آن به طرف راست است. این نیرو (نیروی اصطکاک) مانع حرکت جسم می‌شود.حتی وقتی که جسم ساکن است ممکن است بر آن نیروی اصطکاکی وارد شود ؛ مثلاً اگر جسم سنگینی را روی زمین با نیروی کمی در امتداد افقی بکشیم این نیرو برای به حرکت درآوردن جسم کافی نیست و جسم به حال سکون باقی می‌ماند. در این حال، حتماً نیرویی مساوی و مخالف نیروی خارجی وارد بر جسم آن را خنثی کرده است، این نیروی اخیر همان «نیروی اصطکاک در حال سکون» است. به طور کلی تا هنگامی که نیروی وارد بر یک جسم کمتر از نیروی اصطکاک باشد جسم به حرکت درنخواهد آمد. هرگاه نیروی وارد بر جسم بیشتر از نیروی اصطکاک باشد جسم به حرکت درمی‌آید و در این حالت نیروی اصطکاک را که با نیروی خارجی وارد بر جسم مقابله می‌کند «نیروی اصطکاک در حال حرکت یا اصطکاک جنبشی» نامند (شکل ۲۰ــ۳).

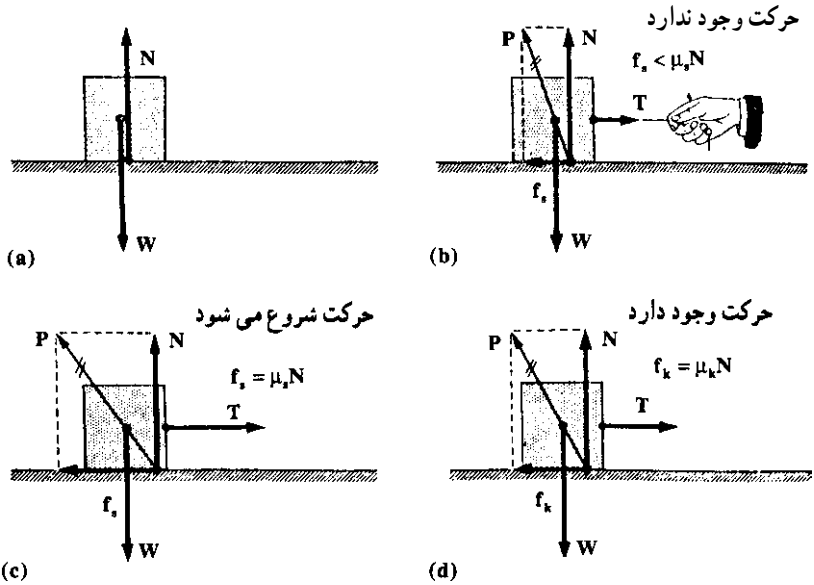
نیروی اصطکاک به این عوامل بستگی دارد :

۱ــ نیروی عمود بر سطح تماس ؛
۲ــ صافی یا زبری سطح تماس ؛
۳ــ جنس دو قطعه در سطح تماس ؛
۴ــ استفاده یا عدم استفاده از موادی که باعث تقلیل اصطکاک می‌شود ؛ مثل روغن و مانند آن.

*** تذکر:**

الف) نیروی اصطکاک در لحظه شروع به حرکت (اصطکاک در حال سکون) بیشتر از نیروی اصطکاک در حین حرکت (اصطکاک جنبشی) است.

ب) مقدار نیروی اصطکاک به اندازه‌ی سطح تماس بستگی ندارد.



شکل ۲۰ــ۳ــ اندازه نیروی اصطکاک وقتی حرکت وجود نداشته باشد کوچکتر یا مساوی $\mu_s N$ و وقتی حرکت وجود داشته باشد برابر $\mu_k N$ است.

۱ــ۶ــ۳ــ انواع اصطکاک جنبشی: اصطکاک لغزشی مانند اصطکاک بین لنت ترمز و کاسه چرخ دراتومبیل ــ حرکت جسم سطحی روی سطح افق یا سطح شیب‌دار که خود نیز بر دو نوع است اصطکاک در حال سکون و اصطکاک غلتشی مانند اصطکاک چرخ با سطح تماس در وسایط نقلیه، اصطکاک در بلبرینگ‌ها و غیره.

الف) اصطکاک لغزشی

رابطه‌های اصطکاک لغزشی :

$$f_K = \mu_K . N \qquad f_S = \mu_S . N$$

علایم اختصاری:

f_S : نیروی اصطکاک در حال سکون

μ_S : ضریب اصطکاک در حال سکون

N : نیروی عکس‌العمل سطح بر جسم

f_K : نیروی اصطکاک در حال حرکت

μ_K : ضریب اصطکاک در حال حرکت

ضرایب اصطکاک μ_S و μ_K بستگی به اندازه‌های سطوح تماس نداشته هر دو ضریب به طور محسوس تابع نوع و جنس وماهیت مواد، درجه صیقلی بودن سطوح، دما و غیره است. مقادیر آن‌ها را با دقت بسیار زیاد حدود پنج درصد تقریب می‌توان محاسبه نمود.

جدول تقریبی مقادیر ضرایب اصطکاک در حال سکون برای سطوح مختلف اجسام خشک در جدول ۱ــ۳ نوشته شده که مقادیر مربوط به ضریب اصطکاک جنبشی آن‌ها حدود ۲۵ درصد کوچکتر است.

جدول ۱ــ۳

نام جسم	ضریب اصطکاک
فلز روی فلز	۰/۱۵ــ۰/۶۰
فلز روی چوب	۰/۲۰ــ۰/۶۰
فلز روی سنگ	۰/۳۰ــ۰/۷۰
فلز روی چرم	۰/۳۰ــ۰/۶۰
چوب روی چوب	۰/۲۵ــ۰/۵۰
چوب روی چرم	۰/۲۵ــ۰/۵۰
سنگ روی سنگ	۰/۴۰ــ۰/۷۰
خاک روی خاک	۰/۲۰ــ۱/۰۰
لاستیک روی سیمان	۰/۶۰ــ۰/۹۰

مثال نمونه «۱»: نیروی لازم برای جابه‌جا کردن دستگاهی را که نیروی وزن آن برابر $W = ۸۰۰۰N$ است به دست آورید ؛ در صورتی که ضریب اصطکاک در حال سکون ۰/۵ درنظر گرفته شود.

$$N = W = ۸۰۰۰N$$

$$f_S = \mu_S \times N = ۰/۵ \times ۸۰۰۰ = ۴۰۰۰ \ N$$

مثال نمونه «۲»: قطعه‌ای مطابق شکل ۲۱ــ۳ روی سطح شیب‌داری قرار گرفته است. حساب کنید زاویه سطح شیب‌دار را برای لحظه‌ای که جسم بخواهد به سمت پایین به حرکت درآید (لحظه تعادل).

حل: در این حالت اگر جسم به سمت پایین حرکت کند، نیروی اصطکاک (f_S) به سمت بالا اثر کرده در لحظه تعادل این نیرو باید برابر مؤلفه نیروی وزن در امتداد سطح شیب‌دار (F) باشد (N مؤلفه‌قائم نیروی W)

$$F = f_S$$

$$f_S = \mu_S \times N$$

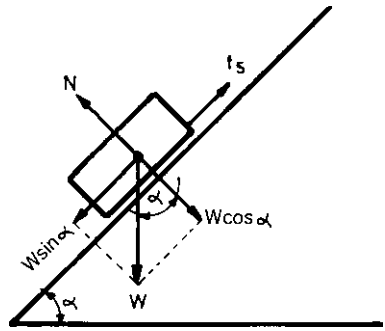
$$N = W \times \cos\alpha$$

$$F = W \times \sin\alpha$$

با جانشین کردن مقادیر محاسبه شده برای (F) و (f_S) خواهیم داشت:

$$W \times \sin\alpha = \mu_S \times W\cos\alpha \Rightarrow \mu = \frac{W\sin\alpha}{W\cos\alpha} = \frac{\sin\alpha}{\cos\alpha} = \tan\alpha$$

$$\boxed{\mu = \tan\alpha}$$



شکل ۲۱ــ۳

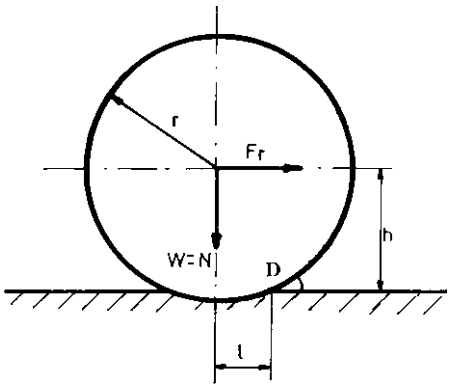
از حل این مسأله نتیجه می‌گیریم که اگر ضریب اصطکاک دو قطعه روی هم، برابر با تانژانت زاویه سطح شیب‌دار باشد جسم در حال تعادل است، اما هنگامی که تانژانت زاویه سطح شیب‌دار کوچکتر از ضریب اصطکاک باشد، جسم در محل خود در حال سکون بوده و اگر تانژانت زاویه سطح شیب‌دار بزرگتر از ضریب اصطکاک باشد جسم با یک شتاب تندشونده به سمت پایین به حرکت درمی‌آید.

بنابراین :

$\mu = \tan\alpha$	تعادل
$\mu > \tan\alpha$	سکون
$\mu < \tan\alpha$	حرکت

ب) اصطکاک غلتشی: وقتی یک چرخ یا یک استوانه روی سطحی بغلتد چون جسم صلب مطلوب وجود ندارد چرخ یا سطح و یا هردو تغییر شکل می‌دهند. مقدار این تغییر شکل‌ها به جنس چرخ و سطح اتکاء بستگی دارد.

چنانچه در شکل (۲۲ــ۳) مشاهده می‌شود برای ایجاد حرکت غلتشی یک چرخ روی سطح بایستی چرخ بتواند برجستگی حاصل از تغییر شکل را خنثی نماید. برای محاسبه نیروی محرک لازم برای این کار نقطه D (مرکز دوران) گشتاور گرفته، شرط تعادل را برای آن می‌نویسیم.



شکل ۲۲ــ۳

علایم اختصاری:

F_r : نیروی اصطکاک غلتشی برحسب نیوتن

h : طول مؤثر گشتاور محرک برحسب cm

N : نیروی عمود بر سطح برحسب نیوتن

l : طول مؤثر گشتاور مقاوم بر حسب cm

$\sum M_D = 0$

$F_r \times h - N \times l = 0$

$F_r \times h = N \times l$

چون در عمل اختلاف اندازه r و h بسیار ناچیز است می‌توان به جای h مقدار r را قرار داد :

$$F_r \times r = N \times l$$

حال اگر از این رابطه مقدار نیروی اصطکاک مورد نظر باشد، می‌توان آن را بدین صورت به دست آورد :

$$F_r = \frac{l}{r} \times N$$

مقدار طول مؤثر گشتاور مقاوم (l) به جنس چرخ و جنس سطح اتکا بستگی دارد که مقدار آن

دراین‌جا داده شده است.

چوب صنوبر روی چوب کاج $l = ۰/۰۸cm$

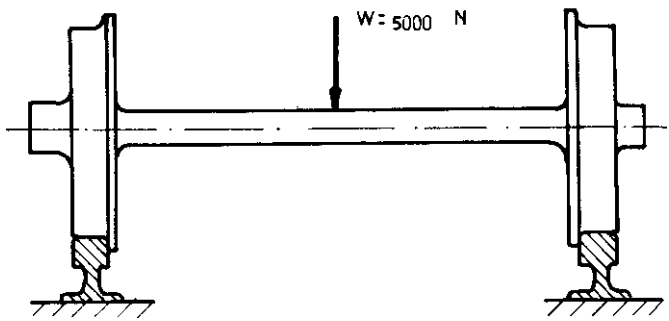
(چدن ــ فولاد ریختگی ــ فولاد) روی فولاد $l = ۰/۰۵ \ldots ۰/۱cm$

در بلبرینگ‌ها چون قطر آن‌ها استاندارد است، در عمل به جای $\frac{l}{r}$ که در اصل ضریب اصطکاک غلتشی است معادل آن μ_i را قرار می‌دهند که مقدار آن با درنظر گرفتن سایر عوامل ۰/۰۰۳ ... ۰/۰۰۱ درنظر گرفته می‌شود ؛ بنابراین، رابطه یاد شده در بلبرینگ‌ها به این صورت خواهد بود :

$$F_r = \mu_i \cdot N$$

مسأله نمونه «۱»: نیروی لازم را برای به حرکت درآوردن یک واگن کوره چوب خشک‌کنی، مطابق شکل ۲۳ــ۳ حساب کنید ؛ اگر نیروی وزن آن $W = ۵۰۰۰N$ و قطر چرخ‌های آن ۱۶ سانتی‌متر و طول مؤثر گشتاور مقاوم آن $l = ۰/۰۵$ سانتی‌متر باشد،

$$N = W = ۵۰۰۰N$$



شکل ۲۳ــ۳

$$F_r = \frac{l}{r} \cdot N$$

$$F_r = \frac{۰/۰۵}{۸} \cdot ۵۰۰۰ = ۳۱/۲۵N$$

مسأله نمونه «۲»: لکوموتیو باری جهت انتقال گرده بینه از جنگل به کارخانه مطابق شکل ۲۴ــ۳ چه توانی باید داشته باشد تا نیروی وزن $W = ۱MN$ را با سرعتی معادل ۷۲ کیلومتر در ساعت به حرکت درآورد ؛ در صورتی که ضریب اصطکاک $\mu_i = ۰/۰۰۵$ و نیروی مقاومت باد $F_W = ۸۰۰۰N$ به حساب آید.

شکل ۲۴ــ۳ــ لکوموتیو حمل گرده بینه

حل:

$$N = W = ۱MN = ۱۰۰۰۰۰۰N$$

$$F_r = N \times \mu_i = ۱۰۰۰۰۰۰ \times ۰/۰۰۵ = ۵۰۰۰N$$

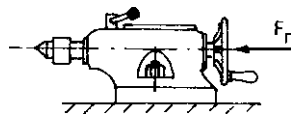
$$F = F_r + F_W = ۵۰۰۰ + ۸۰۰۰ = ۱۳۰۰۰N$$

$$V = \frac{۷۲ \times ۱۰۰۰}{۳۶۰۰} = ۲۰m/s$$

$$P = \frac{F \times V}{۱۰۰۰} = \frac{۱۳۰۰۰ \times ۲۰}{۱۰۰۰} = ۲۶۰kW$$

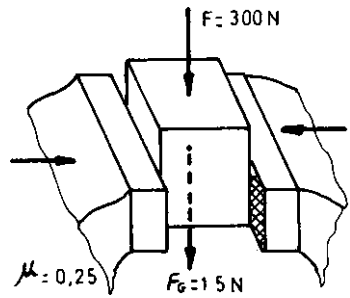
تمرین

۱ــ مقدارنیروی لازم را برای به حرکت درآوردن دستگاه مرغک روی میز ماشین خراطی مطابق شکل ۲۵ــ۳ حساب کنید، اگر نیروی وزن آن $W = ۲۰۰N$ و ضریب اصطکاک $\mu = ۰/۱۵$ باشد.



شکل ۲۵ــ۳

۲ــ قطعه‌کاری که نیروی وزن آن $W = ۱۵N$ است به وسیله گیره‌ای مطابق شکل **۲۶ــ۳** محکم شده است. حساب کنید، نیروی وارد ازطرف فک‌های گیره به سطح کار را اگر نیروی عمودی وارد بر قطعه کار $۳۰۰N$ و ضریب اصطکاک سطح $\mu = ۰/۲۵$ باشد.



شکل ۲۶ــ۳

۳ــ برای رنده کردن الواری روی دستگاه کف‌رند در صورتی که وزن الوار $W = ۴۵۰N$ ، $\mu_s = ۰/۳۰$ ، $\mu_k = ۰/۲۲$ باشد، نیروهای لازم داده شده را محاسبه نمایید.

الف) مقدار نیروی لازم برای شروع حرکت ؛

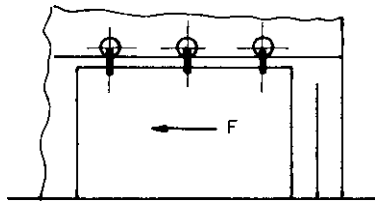
ب) مقدار نیروی لازم در حال حرکت قبل از رنده شدن ؛

ج) مقدار نیروی لازم در حال رنده شدن ؛ در صورتی که تیغه نیرویی افقی معادل $F = ۲۰N$ به الوار وارد نماید.

۴ــ بعد از تولید تخته خرده چوب، برای مرتب چیده شدن آن‌ها مطابق شکل **۲۷ــ۳** لازم است که صفحات روی هم کشیده شوند. اگر جرم یک ورق $m = ۶۰kg$ و ضریب اصطکاک $\mu_S = ۰/۵$ باشد، نیروی لازم را برای کشیدن و جابه‌جا کردن یک ورق به دست آورید.

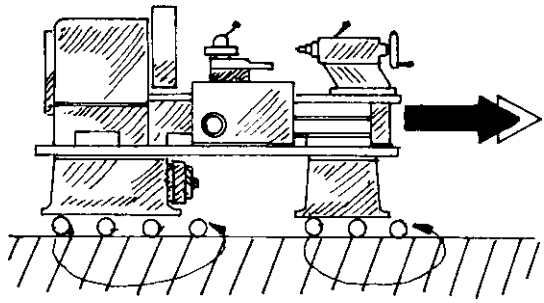
شکل ۲۷ــ۳ــ چیدن صفحات تخته خرده چوب

۵ــ درب انباری به وسیله بلبرینگ مطابق شکل ۲۸ــ۳ حرکت می‌کند. نیروی لازم باز و بسته شدن آن را حساب کنید اگر نیروی وزن آن $W = ۴۰۰۰N$ و ضریب اصطکاک $\mu_i = ۰/۰۰۵$ باشد.



شکل ۲۸ــ۳

۶ــ برای جابه‌جا کردن دستگاهی مطابق شکل ۲۹ــ۳ نیروی لازم آن را در دو حالت محاسبه کنید (اگر نیروی وزن آن $W = ۸۰۰۰N$ باشد) :



شکل ۲۹ــ۳

الف) اگر بخواهیم آن را روی کف کارگاه به حرکت درآوریم ؛ در صورتی که ضریب اصطکاک آن $\mu = ۰/۵$ باشد.

ب) اگر برای همین منظور، زیر آن غلتک‌هایی به قطر $d = ۱۲۰$ میلی‌متر قرار دهیم ؛ در حالی که طول مؤثر گشتاور مقاوم $l = ۰/۰۵$ سانتی‌متر باشد.

۷ــ در یاتاقان‌بندی میله ترانسمیسیونی که نیرویی برابر $F = ۲۰۰۰N$ بر آن وارد می‌آید، اگر از یاتاقان‌بندی لغزشی با ضریب اصطکاک $\mu = ۰/۱$ و یا از یاتاقان‌بندی غلتشی با ضریب اصطکاک $\mu_i = ۰/۰۰۲$ استفاده کنیم، نیروهای اصطکاک را با هم مقایسه کنید.

۸ــ صندوق مخصوص حمل قطعات چوبی با جرم ۷۵ کیلوگرم را روی کف افقی کارگاه

بانیرویی معادل ۳۵۰ نیوتن به وسیله یک طناب که امتداد آن با راستای افقی زاویه ۳۷° می‌سازد با سرعت ثابت کشیده می‌شود. ضریب اصطکاک بین کف کارگاه و صندوق را حساب کنید.

۹ــ الواری به جرم ۶۰ کیلوگرم را می‌خواهیم به وسیله اره نواری برش بزنیم ؛ در صورتی که ضرایب اصطکاک بین الوار و صفحه دستگاه به ترتیب $\mu_s = ۰/۳۵$ و $\mu_k = ۰/۲۵$ باشد، محاسبه کنید :

الف) حداقل نیرویی که باعث شروع حرکت الوار روی صفحه‌ی دستگاه می‌شود ؛

ب) مقدار نیرویی که باعث خنثی نمودن نیروی اصطکاک جنبشی می‌شود ؛

ج) اگر در هنگام برش الوار نیرویی عمودی معادل ۱۰۰ نیوتن و نیرویی افقی معادل ۸۰ نیوتن ازطرف اره به الوار وارد شود، برای حرکت الوار روی دستگاه مقدار نیروی لازم را با سرعت ثابت به دست آورید.

۱۰ــ نیرویی که به یک واگن حمل چوب می‌توان وارد نمود حدود ۷۰۰ نیوتن است. حساب کنید حداکثر باری را که به وسیله این واگن می توان حمل کرد ؛ در صورتی که نیروی وزن خود واگن ۴۰۰ نیوتن و ضریب اصطکاک غلتشی $F_i = ۰/۲۵$ باشد.

سؤالات آزمون پایان فصل سوم

۱ــ کار مکانیکی را تعریف کنید.
۲ــ در کدام یک از این موارد کار انجام می‌گیرد؟
الف) بلند کردن یک الوار بر روی دست.
ب) حرکت کردن در صورتی که الوار روی دست قرار دارد.
۳ــ یک ژول کار را تعریف کنید.
۴ــ صور مختلف انرژی را نام ببرید.
۵ــ توان مکانیکی را تعریف کنید.
۶ــ منظور از راندمان دستگاه چیست؟
۷ ــ نیروی اصطکاک را تعریف نمایید.
۸ ــ منظور از نیروی اصطکاک در حال سکون چیست؟
۹ ــ نیروی اصطکاک جنبشی را تعریف کنید.
۱۰ ــ نیروی اصطکاک به چه عواملی بستگی دارد؟
۱۱ــ تفاوت اصطکاک لغزشی را با اصطکاک غلتشی بنویسید.

تمرین

۱ــ ظرفیت بالابری ۵۴ کیلوژول است. اگر لازم باشد از این بالابر برای حمل صندوق روکش استفاده شود، درهر دفعه چند صندوق را می‌توان تا ارتفاع ۳ متری بالا برد ؛ در صورتی که هر صندوق ۶۰۰ کیلوگرم جرم داشته باشد.

۲ــ نقاله‌ی زنجیره‌ای برای حمل گرده‌بینه تا ارتفاع ۱/۵ متری موجود است. اگر زمان حمل ۳۰ ثانیه و مشخصات گرده‌بینه با قطر ۷۰cm طول ۲/۲m و جرم ویژه ۰/۶۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب باشد، توان موتور این نقاله رابرحسب کیلووات و اسب بخار به دست آورید.

۳ــ توان گرفته شده الکتروموتور دستگاهی $P_1 = 800W$ وراندمان آن $\eta_E = 0/85$ می‌باشد، اگر این توان به وسیله چرخ دنده‌ای با راندمان $\eta = 0/75$ منتقل شود، این موارد را حساب کنید :
الف) راندمان کل دستگاه ؛
ب) توان محور متحرک.

۴ــ دستگاه فرزی با قطر پولی ۱۰۰ میلی‌متر موجود است، اگر دارای الکتروموتوری با این مشخصات باشد، نیروی محیطی آن را حساب کنید :

ــ تعداد دور موتور $۶۰۰۰ \mathrm{I/min}$

ــ توانی معادل $P_۱ = ۳/۵ \mathrm{kW}$

ــ راندمان الکتروموتور $\eta_E = ۰/۹۰$.

ــ راندمان ماشینی $\eta_M = ۰/۷۵$.