دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی حمل و نقل

حمل و نقل ریلی

حرکت قطارها

مدرس: محمد تمنایی

بهار ۱۳۹۴

حرکت قطارها

فهرست مطالب:

- ✓ نیروهای مقاوم در حرکت قطار
- ✓ نیروی کشش لوکوموتیو
- ✓ نیروی ترمز
- ✓ معادله حرکت قطار
- ✓ سرعت، زمان و فاصله در حرکت قطار

جریه و پارامترهای مؤثر در آن

نیروی محرک

نیرویی که از طرف لوکوموتیو تأمین می شود.

نیروهای مقاوم

نیروهایی که در مقابل حرکت قطار، عکس العمل منفی از خود بروز می دهند.
نیروهای مقاوم بر دو دسته تقسیم می شوند:
۱-نیروهای مقاوم اصلی
۲-نیروهای مقاوم مربوط به ساختمان خط

نیروهای مقاوم اصلی

زمانی که واگن ها و واحدهای متحرک در مسیری بر فراز صفر (سطح افق) و بدون قوس حرکت می کنند

نیروهای بازدارنده –که به آنها نیروهای مقاوم اصلی گویند– بر آنها مؤثر هستند:

- ✓ نیروی اصطکاک بین چرخها و ریلها
- ✓ نیروی اصطکاک در یاتاقان ها و سر محورها
- ✓ نیروی اصطکاک هوا
- ✓ نیروی اصطکاک ناشی از ضربه چرخ ها و در درزها

نیروهای مقاوم مربوط به ساختمان خط

- ✓ نیروی مقاوم در فرازها
- ✓ نیروی مقاوم در قوس ها
- ✓ نیروی مقاوم در سوزن ها
- ✓ نیروی مقاوم در تونل ها

نیروهای مقاوم اصلی

- ✓ در همه کشورها فرمولهای حاصله برای نیروهای مقاوم اصلی یک تن وزن قطار ارائه شده که بر حسب kg/ton است.
- ✓ معروفترین فرمول برای محاسبه نیروی مقاومت اصلی: فرمول دیویس DAVIS

$$R_w = A + \frac{B}{W} + C\mathcal{V} + \frac{Da}{W \times n}\mathcal{V}^{۲}$$

R_w مقدار نیروی مقاوم اصلی برای واحد وزن قطار (کیلوگرم-نیرو بر تن)

W: وزن یا بار محوری (تن)

n: تعداد محور وسیله نقلیه

a: سطح مقطع وسیله نقلیه در مقابل حرکت (متر مربع)

v: سرعت (کیلومتر در ساعت)

✓ فرمول دیویس DAVIS

$$R_w = A + \frac{B}{W} + CV + \frac{Da}{W \times n}V^2$$

ضرایب A, B, C, D: ضرایبی هستند که بستگی به نوع وسیله نقلیه دارند.

ضرایب ثابت معادله دیویس

نام وسیله نقلیه	A	B	C	D
لکوموتیو	0.65	13.2	0.00931	0.00453
واگن باری	0.65	13.2	0.01395	0.000944
واگن مسافری	0.65	13.2	0.00931	0.000642

مقدار a (سطح مقطع موثر) برای لوکوموتیو برابر ۱۲,۳ و برای واگن برابر ۸,۶ در نظر گرفته میشود.

نیروهای مقاوم اصلی

✓ فرمول اروپایی (برای واگن ها)

نوع قطار	تعداد محور	فشار محور بر ریل (تن)	فرمول نیروی مقاوم اصلی (Kgf/Ton)
مسافربری	۴	۱۰ – ۱۲,۵	$W=1.35+0.008V+0.00033V^2$
باری	۴	۱۵ – ۲۰	$W=1.4+0.00033V^2$
باری خالی	۴	۵ – ۹,۹	$W=2+0.0008V^2$
باری	۲	۱۵ – ۲۰	$W=1.8+0.03V+0.00018V^2$
باری خالی	۲	۵ – ۹,۹	$W=2+0.00125V^2$
باری عمومی	۴+۲	---	$W=b_2W_2+b_4W_4$

$$b_2=q_2.n_2/Q_0$$

$$b_4=1-b_2$$

V سرعت (کیلومتر برساعت)

b_2 نسبت وزن واگنهای ۲محوره به وزن کل قطار

b_4 نسبت وزن واگنهای ۴محوره به وزن کل قطار

q_2 وزن متوسط واگنهای ۲محوره

n_2 تعداد واگنهای ۲محوره قطار

Q_0 وزن کل قطار

نیروی مقاوم فراز (نشیب)

عامل ایجاد این مقاومت شیب مسیر خط است که مقدار آن از رابطه زیر به دست می آید:

$$w_i = G.\sin\alpha \cong G.\tan\alpha \cong G.\alpha$$

w_i: نیروی مقاوم فراز

G: وزن واگن

α: زاویه سطح شیبدار که ریل گذاری شده است

نیروی مقاوم قوس ها

نیروی مقاوم قوس ها

- $w=\frac{650}{R-55}$ (فرمول Rocklov) برای قوس های با شعاع بیشتر از ۵۰۰ متر
- $w=\frac{500}{R-30}$ (فرمول Corin guv) برای قوس های با شعاع کمتر از ۵۰۰ متر
- $w=\frac{441}{R-45}$ (فرمول کامپساکس) برای شرایط ایران

نیروی مقاوم سوزن ها

- مقدار نیروی مقاوم سوزن ها: ۰,۵ تا ۱ کیلوگرم به ازای هر ۱ تن وزن قطار

نیروی مقاوم تونل ها

$$R_{Tonnel} = 2.7 + 0.9 \times \frac{V}{M_{total}}$$

- R_{Tonnel}: نیروی مقاوم تونل (kgf)
- V: سرعت (km/h)
- M_{total}: جرم کل قطار (ton)

توان کشش لوکوموتیو از فرمول زیر بدست می آید:

$$N_K = \eta_G \times \eta_b \times \eta_d \times N_e$$

N_K: توان کشش لوکوموتیو دیزلی

$\eta_G \times \eta_b \times \eta_d$: ضرایب تأثیر موتورها، چرخ دنده ها و ژنراتورها

N_e: توان کل لوکوموتیو دیزلی

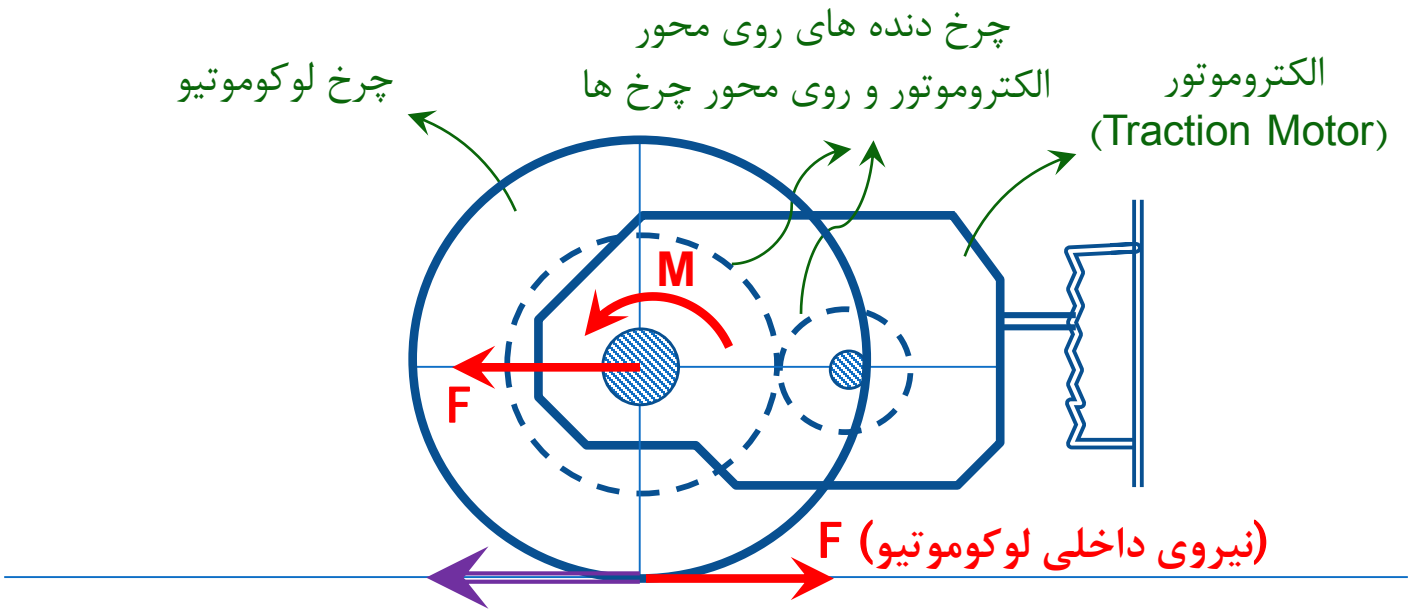
نیروی کشش لوکوموتیوها

$$F_K = \frac{270 \times N_K}{V} = 270 \times \eta_G \times \eta_b \times \eta_d \times \frac{N_e}{V}$$

- F_K: نیروی کشش لوکوموتیو (kgf)
- راندمان کاری لوکوموتیو: $\eta_G \times \eta_b \times \eta_d$
- N_e: توان کشش لوکوموتیو دیزلی (hp)
- V: سرعت (km/h)

F_K نیروی داخلی لوکوموتیو است که خود به تنهایی نمی تواند موجب حرکت لوکوموتیو شود.

نیروی کشش لوکوموتیوها



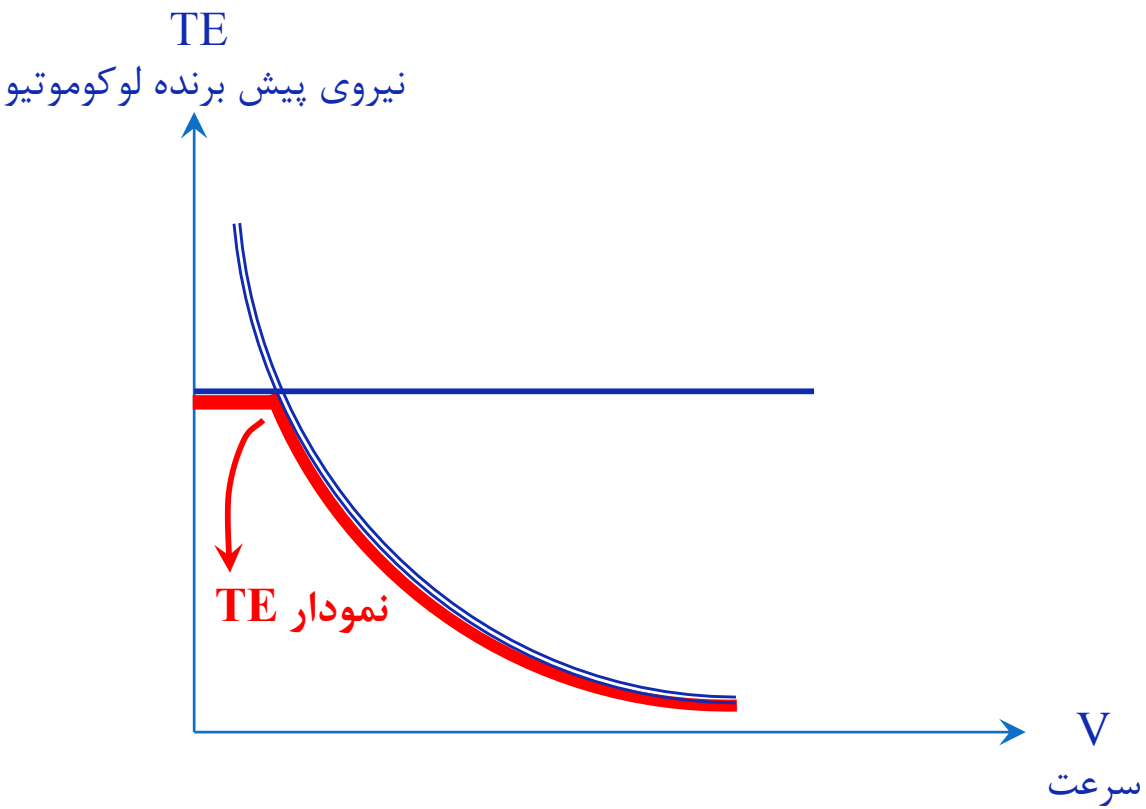
نیروی کشش لوکوموتیوها

- نیروی خارجی محرکه ناشی از لوکوموتیو (نیروی TE) تا حدی می تواند افزایش یابد ولی این نیروی محرکه نمی تواند از نیروی چسبندگی بین چرخ و ریل بیشتر باشد.

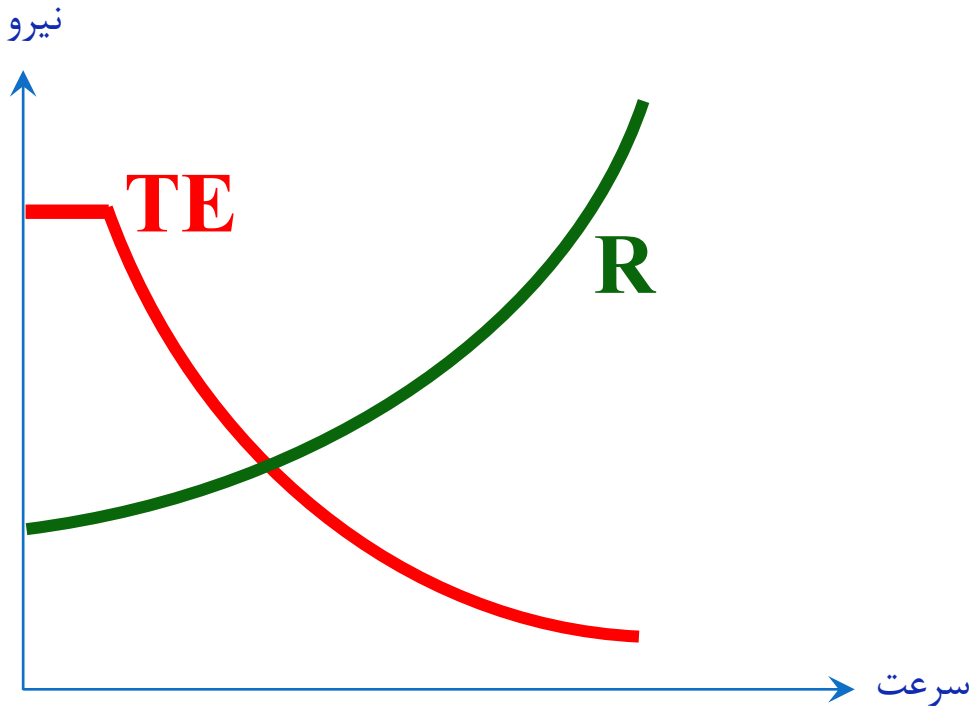
$$F_{Adhesive} = 1000 \times \Psi_K \times \sum_{i=1}^{n} \pi_i$$

- $F_{Adhesive}$: نیروی چسبندگی (kgf)
- Ψ_K: ضریب چسبندگی بین ریل و چرخ ها
- n: تعداد چرخ های لوکوموتیو
- π_i: فشار روی یک چرخ (ton)

$$TE = \text{Min}\left\{1000 \times \Psi_K \times \sum_{i=1}^{n} \pi_i \, , \, \frac{270 \times \eta \times N_e}{V}\right\}$$



نیروی کشش لوکوموتیوها



❖ فرمول تجربی برای محاسبه ضریب چسبندگی:

$$\Psi_K = \frac{1}{3.8 + 0.035 \times V}$$

❖ فرمول تجربی دیگر برای محاسبه ضریب چسبندگی:

$$\Psi_K = \frac{7}{5 \times (V+44)} + 0.161$$

سرعت: متر بر ثانیه

نیروی کشش لوکوموتیوها

- لوکوموتیوهای دیزل الکتریک، برقی هستند. فشارهای زیاد می تواند شدت جریان برق را بالا ببرد که در نتیجه باعث سوختگی عایق سیم پیچ ژنراتور می شود.
- لذا معمولا بر روی نمودار کشش، نقطه بخصوصی را به عنوان «نیروی کشش مداوم» نشان می دهند.
- سرعت معادل با نیروی کشش مداوم، به عنوان «سرعت مداوم Continuous Speed» مطرح می شود.
- برای این که قطار بتواند بر روی سطح شیبدار با سرعت یکنواخت و نیروی کشش مداوم حرکت کند، باید برآیند نیروهای مقاوم برابر با نیروی کشش لوکوموتیو گردد:

$$F_K = Q \times (W_0 + W_{i\max}) + P \times (W_L + W_{i\max})$$

- F_K: نیروی کشش مداوم (Kg)
- Q: وزن قطار بدون لوکوموتیو (Ton)
- W_0: نیروهای مقاوم اصلی واگنها (Kg/Ton)
- P: وزن لوکوموتیو (Ton)
- $W_{i\max}$: نیروی مقاوم در حداکثر فراز (Kg/Ton)
- W_L: نیروهای مقاوم اصلی لوکوموتیو (Kg/Ton)

نیروی کشش لوکوموتیوها

❖ اگر لوکوموتیو و قطار بر روی فراز حداکثر قرار داشته باشند و لوکوموتیو بخواهد از حالت توقف شروع به حرکت کند، حداکثر وزن قطار در این حالت برابر است با:

نیروی چسبندگی (Kg)

نیروهای مقاوم ایستایی
(نیروی اینرسی- نیروی لختی)
حد بین ۸ تا ۱۰ (Kg/Ton)

$$Q = \frac{\Psi_K \times \sum_{i=1}^{n} \pi_i - P \times (W_L + W_{imax} + W_S)}{(W_0 + W_{imax} + W_S)}$$

وزن قطار بدون
لوکوموتیو (Ton)

فراز حاکم

- فرازی است که طول آن محدود نیست و بر روی آن قطار با سرعت مداوم و لوکوموتیو با کشش مداوم حرکت می کند.
- مقدار این فراز در رابطه تعیین حداکثر وزن مجاز قطار استفاده می شود.
- اگر نوع لوکوموتیو و فراز حاکم مشخص باشند، می توان وزن قطار را جهت بهره برداری انتخاب نمود.
- اگر وزن قطار و فراز حاکم مشخص باشند، می توان نوع لوکوموتیو را از نظر کشش انتخاب نمود.

فراز متوازن

- در برخی مواقع در مسیر ریلی، قطارها در یک جهت با بار (و در نتیجه با وزن بیشتر) و در جهت برگشت بدون بار برمیگردند.
- در جهت برگشت، جهت قطارهای خالی فرازی بزرگتر از فراز حاکم را می توان پذیرفت که به آن فراز متوازن گویند.

فراز کشش دوبله

- فرازی بزرگتر از فراز حاکم است.
- قطارها برای عبور از فراز کشش دوبله، علاوه بر لوکوموتیو اصلی با لوکوموتیوهای کمکی (هول دهنده) حرکت می کنند.

فراز شتاب جنبشی

- فرازی بزرگتر از فراز حاکم است. ولی طول آن محدودتر است.
- قطار بر روی این نوع فرازها با شتاب جنبشی حرکت می کند.
- در طراحی مسیر طول فراز، شتاب جنبشی را باید طوری محاسبه نمود که در انتهای طول، سرعت قطار کمتر از سرعت مداوم نباشد.

ترمز

❖ در حین ترمز باید توجه داشت که چرخ های واگنها و لوکوموتیوها نباید به هیچ وجه روی ریل ها سر بخورند. زیرا باعث بریدگی چرخ ها و اثرات منفی روی ریل می شود (سریدن Coasting).

$$K \times \varphi_K < \pi \times \Psi$$

- K: فشار کفشک ها (Ton)
- φ_K: ضریب اصطکاک بین کفشک و طوقه چرخ
- π: فشار محوری (Ton)
- Ψ: ضریب اصطکاک بین چرخ و ریل

❖ محاسبه ضریب اصطکاک بین کفشک و طوقه چرخ (نتایج آزمایشات تجربی):

$$\varphi_K = 0.32 \times \frac{V+100}{5V+100}$$

φ_K: ضریب اصطکاک بین کفشک و طوقه چرخ

V: سرعت (km/h)

❖ محاسبه نیروی کلی ترمز قطار (B_m):

$$B_m = 1000 \times \sum_{i=1}^{n} k_i \times \varphi_k = 1000 \times \varphi_k \sum_{i=1}^{n} k_i$$

B_m: نیروی ترمز (kg)

$\sum_{i=1}^{n} k_i$: مجموع فشار کلیه کفشک ها (Ton)

❖ اگر Q وزن قطار باشد و $\sum k_i$ مجموع فشار کلیه کفشک ها باشد، بهیچ وجه نباید با Q برابر یا بیشتر شود.

$$\theta = \frac{\sum k_i}{Q} < 1$$

نسبت ترمز مجاز θ در خطوط اصلی راه آهن ج.ا.ا با ترمز تدریجی

سرعت

شیب در هزار	0	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
0	6	6	6	6	8	11	15	20	26	33	41	51	62	76	93	
1	6	6	6	7	9	12	16	21	27	34	42	53	64	78	95	
2	6	6	6	8	10	13	18	23	29	36	44	54	66	80	97	
3	6	6	7	9	11	15	19	24	30	37	46	56	68	82	99	
4	6	6	8	10	12	16	20	26	32	39	48	58	70	85	*	
5	7	7	9	11	14	17	22	27	33	41	50	60	72	87	*	
6	7	8	10	12	15	19	23	28	35	42	51	62	74	89	*	
7	8	9	11	13	16	20	24	30	36	44	53	64	76	91	*	
8	9	10	12	14	17	21	26	32	38	46	55	66	78	93	*	
10	11	12	14	17	20	24	29	35	41	49	59	70	83	98	*	
12	13	14	16	19	23	27	32	38	45	53	63	74	87	*	*	
14	15	17	19	22	25	30	35	41	48	56	66	78	91	*	*	
16	17	19	21	24	28	32	38	44	52	60	70	82	95	*	*	
18	19	21	23	27	31	35	41	47	55	64	74	86	99	*	*	
20	21	23	26	29	33	38	44	51	58	67	78	90	*	*	*	
22	23	25	28	32	36	41	47	54	62	71	82	94	*	*	*	
25	26	29	32	36	40	46	52	59	67	76	87	*	*	*	*	
30	32	34	38	41	47	53	66	67	76	86	*	*	*	*	*	

❖ محاسبه نیروی مقاوم ترمز بازای یک تن وزن قطار (b):

$$b = 1000 \times \varphi_k \times \theta$$

b: نیروی ترمز بازای یک تن وزن قطار (kg)

φ_k: نسبت فشار ترمز به وزن قطار

❖ b در واقع نیروی ترمزی است که در حالات اضطراری استفاده می شود.

❖ معمولا در راه آهن از ترمز تدریجی استفاده می کنند. جهت محاسبات برای ترمز تدریجی، **نصف** b را منظور میکنند.

معادله حرکت قطار

در رابطه با پروفیل طولی مسیر، عملکرد قطار به ۳ حالت طبقه بندی می شود:

الف) حالت کششی

حرکت قطار بر اساس کار لوکوموتیو است که موجب ایجاد انرژی جنبشی می گردد.

ب) حالت خنثی

از نیروی کششی لوکوموتیو استفاده نمی شود (همچون قرار گرفتن در سرازیری ها)

ج) حالت ترمز

از نیروی ترمز استفاده می شود.

برآیند نیروهای بازدارنده عبارتست از: W_K+B_t (W_K برآیند مقاومتها و B_t برآیند نیروی ترمز)

معادله حرکت قطار

برآیند نیروهای بازدارنده عبارتست از: W_K+B_t (W_K برآیند مقاومتها و B_t برآیند نیروی ترمز)

نیروی شتابدهنده کل:

$$F_K - W_K - B_t = C \quad (kg)$$

نیروی شتابدهنده بازای ۱ تن وزن قطار:

$$f_K - w_K - b_m = C \quad (kg/ton)$$

نیروی شتابدهنده بازای ۱ تن وزن قطار اگر قطار بر روی سطح تراز باشد:

$$f_K - w_0 - b_m = C_0 \quad (kg/ton)$$

C_0 مثبت: سرعت قطار افزایش می یابد.

C_0 منفی: سرعت قطار کاهش می یابد.

رابطه نیروی شتاب دهنده و شتاب

- شتاب جسم در سقوط آزاد برابر $g=9.8\ m/sec^2$

$$g=9.8\frac{m}{Sec^2}=\frac{9.8\times3600^2}{1000}=127000\frac{km}{h^2}=2120\frac{km/h}{min}$$

- اگر به ازای هر ۱ تن وزن قطار، نیروی شتاب دهنده ای معادل 1 kgf مؤثر باشد، در جهت حرکت قطار بایستی شتاب $9.8:1000\ m/s^2$ یا 2.120 km/h/min داشته باشیم.
- ضریب اصلاح مربوط به جرم های دوار مانند چرخها و الکتروموتور و... برابر با ۶٪ (کاهش ۶ درصدی شتاب):

$$\frac{2.12}{1.06}\frac{km/h}{min}=2\frac{km/h}{min}=120\frac{km}{h^2}$$

معادلات حرکت قطار

$$a=2\times(f_K-w_K-b_m)=2C \quad (km/h/min)$$

$$a=120\times(f_K-w_K-b_m)=120C \quad (km/h^2)$$

$$a=\frac{1}{30}\times(f_K-w_K-b_m)=\frac{1}{30}C \quad (km/h/sec)$$

رابطه نیروی شتاب دهنده قطار با سرعت و زمان

$$a=120\times(f_K-w_K-b_m)=120\times C_{n,n+1} \quad (a:km/h^2)$$

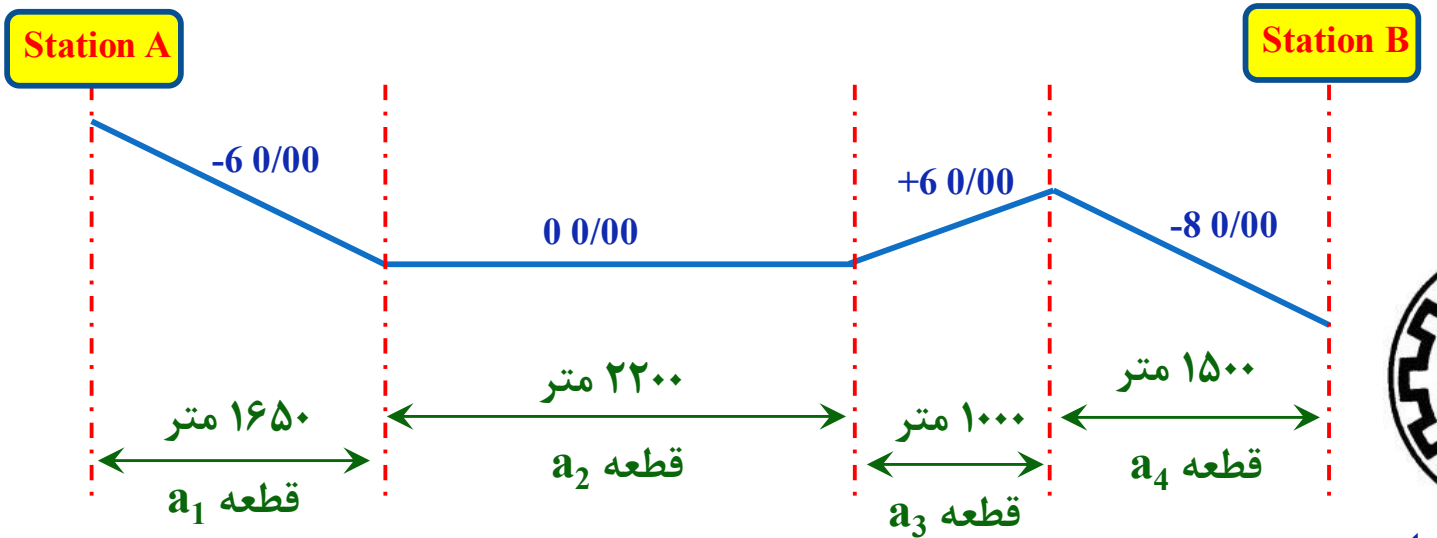
$$t_2-t_1=\frac{V_2-V_1}{120\times C_{n,n+1}} \qquad (t:hours\ ,C_{n,n+1}:kgf\ ,V:km/h)$$

رابطه نیروی شتاب دهنده قطار با فاصله

$$S_2-S_1=\frac{4.17\times(V_2^2-V_1^2)}{C_{n,n+1}} \qquad (S:m)$$

تمرین

- مثال: مطلوبست تعیین پروفیل سرعت- موقعیت برای حرکت قطار در سیرگاه A-B
- (قطار در ایستگاه A از حال سکون شروع به حرکت میکند و در ایستگاه B توقف دارد)
- (کلیه نیروهای کشش، مقاوم و ترمز در نظر گرفته شوند- اندازه هر المان ۵۰ متر)
- اطلاعات مسئله: سرعت ماکزیمم مجاز ۷۰ کیلومتربرساعت، لوکوموتیو ۶محوره ۱۲۰تنی با قدرت ۳۳۰۰ اسب بخار، ضریب کارآیی لوکوموتیو ۰,۸، تعداد۳۰ واگن ۴محوره پر هریک به وزن ۸۰ تن، نسبت ترمز مجاز ۴۱٪، ضریب چسبندگی ۰,۳، سایر اطلاعات موردنیاز فرض شوند.



مراجع:

William Hey, 1984 “Railroad Engineering", A Wiley-Interscience Publication, JOHNS WILEY $ SONS, Second Edition.

خسرو آذری (۱۳۸۲)، «مهندسی راه آهن»، مهندسین مشاور مترا، تهران.

محمد علی صندیدزاده، شیرین صفرخانی تبریزی، احمد میرآبادی (۱۳۸۶)، «شبیه سازی دینامیک حرکت قطار در راه آهن شهری»، پژوهشنامه حمل و نقل، سال چهارم، شماره دوم