

# حجم عملیات خاکی و منحنی پروکنر

# حجم عملیات خاکی

منظور از عملیات خاکی و محاسبات مربوط به آن، مجموعه اقداماتی است که با هدف تعیین احجام و پارامترهای زیر انجام می گیرد:

## ۱. دکوپاژ (Decapage)

عبارت است از **کندن و برداشت خاکهای نباتی** (خاکهای دارای مواد آلی، ریشه و ساقه درختان) و مواد زاید از سطح زمین طبیعی بستر راه یا محوطه. این عملیات معمولاً قبل از اجرای لایه های خاکریز و یا لایه های روسازی بر روی سطح زمین طبیعی، در عمق بین **۱۰ تا ۳۰ سانتی متر** انجام می گیرد.

# حجم عملیات خاکی

## ۲. خاک برداری (Cut)

عبارت است از کندن و برداشت خاک در محل هایی از طول زمین طبیعی که رقوم آنها بیشتر از رقوم خط پروژه است.

## ۳. خاک ریزی (Fill)

عبارت است از ریختن خاک و تراکم آن در محل هایی از طول زمین طبیعی که رقوم آنها کمتر از رقوم خط پروژه است.

# حجم عملیات خاکی

## ۴. دیپو (Depot)

عبارت است از محلی که خاک های اضافی حاصل از عملیات خاکبرداری به آنجا حمل و در آن انبار می شود.

## ۵. قرضه (Borrow)

در صورتی که نتوان تمام خاک مورد نیاز در خاکریزها را از محل خاکبرداری های پروژه تامین کرد، خاک مورد نیاز را از محل دیگری تامین می کنند که قرضه نام دارد.

# حجم عملیات خاکی

## ۶. انقباض (Shrinkage)

هنگامی که خاک متراکم می شود معمولاً از حجمش کاسته می شود، طوری که وزن خاک موجود در یک مترمکعب قرضه پس از تراکم، حجمی کمتر از یک مترمکعب خواهد داشت. به این کاهش حجم خاک در اثر تراکم، انقباض خاک گفته می شود. ضریب انقباض خاک را می توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$\text{ضریب انقباض} = \left( 1 - \frac{\text{وزن مترمکعب قرضه}}{\text{وزن مترمکعب متراکم}} \right) \times 100$$

# حجم عملیات خاکی

## ۷. تورم (Swell)

هنگامی که خاک کنده می شود معمولا به حجمش اضافه می گردد، طوری که وزن خاک موجود در یک مترمکعب قرضه پس از خاک برداری، حجمی بیشتر از یک مترمکعب اشغال خواهد کرد. به این افزایش حجم خاک در اثر خاک برداری، تورم خاک گفته می شود. ضریب تورم خاک را می توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$\text{ضریب تورم} = \left( \frac{\text{وزن مترمکعب قرضه}}{\text{وزن مترمکعب سست}} - 1 \right) \times 100$$

نوع خاک	حالت مست	حالت طبیعی	حالت متراکم
رس خشک	۱/۲۴	۱/۵۷	۱/۷۲
رس مرطوب	۱/۶۰	۲/۱۴	۲/۳۴
رس و شن خشک	۱/۴۲	۱/۶۶	۱/۸۴
رس و شن مرطوب	۱/۵۴	۱/۸۴	۲/۰۲
شن خشک	۱/۶۶	۱/۸۷	۲/۰۸
شن مرطوب	۱/۸۴	۲/۱۴	۲/۳۴
ماسه خشک	۱/۵۴	۱/۷۲	۱/۹۰
ماسه مرطوب	۱/۸۴	۲/۰۸	۲/۲۸
شن و ماسه خشک	۱/۷۲	۱/۹۳	۲/۱۱
شن و ماسه مرطوب	۲/۰۲	۲/۲۲	۲/۴۳
خاک طبیعی خشک	۱/۳۰	۱/۶۹	۱/۸۷
خاک طبیعی با رطوبت کم	۱/۴۲	۱/۸۴	۲/۰۲
خاک طبیعی با رطوبت زیاد	۱/۶۳	۲/۰۲	۲/۲۲

جدول شماره (۵) وزن مخصوص تقریبی خاک ها بر حسب  $(gr/cm^3)$

جدول ۱-۲ : مقادیر ضریب تبدیل حجم خاک

نوع خاک	شرایط اولیه خاک		تبدیل به حالت
	در محل طبیعی	سست	
	متراکم	متراکم	متراکم
رس	در محل قرصه	۱/۰۰	۱/۲۷
	سست	۰/۷۹	۱/۰۰
زمین معمولی	متراکم	۱/۱۱	۱/۴۱
	در محل	۱/۰۰	۱/۲۵
	سست	۰/۸۰	۱/۰۰
	متراکم	۱/۱۱	۱/۳۹
سنگ (خرده شده)	در محل	۱/۰۰	۱/۵۰
	سست	۰/۶۷	۱/۰۰
	متراکم	۰/۷۷	۱/۱۵
ماسه	در محل	۱/۰۰	۱/۱۲
	سست	۰/۸۹	۱/۰۰
	متراکم	۱/۰۵	۱/۱۸



# حجم عملیات خاکی

## روش های محاسبه سطح نیمرخ های عرضی

برای محاسبه مساحت نیمرخ های عرضی می توان از روش های مختلفی استفاده کرد که چند نمونه از این روش ها به شرح زیر هستند:

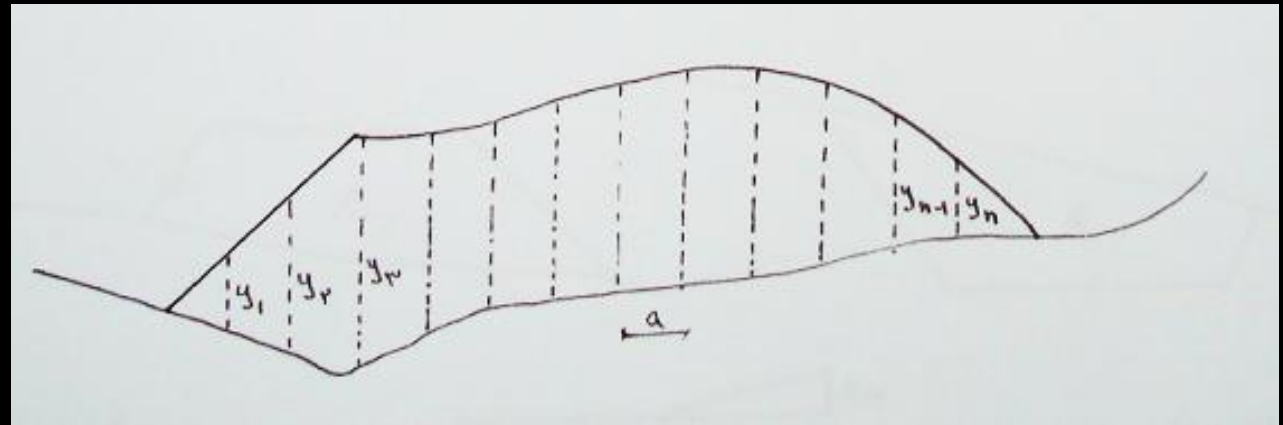
### ۱. روش هندسی

در این روش شکل نیمرخ به قطعه های کوچکتر هندسی تقسیم شده و با محاسبه و جمع سطوح کوچکتر، سطح کل نیمرخ بدست می آید. معمولاً سطح نیمرخ هایی که دارای شکل هندسی منظم هستند، از این روش محاسبه می گردد.

# حجم عملیات خاکی

## ۲. روش تبدیل به سطوح کوچکتر

در این روش نیم رخ عرضی را پس از ترسیم با خطوط قائم موازی به فواصل مساوی تقسیم کرده و سپس سطح نیم رخ عرضی را با استفاده از رابطه زیر بدست می آورند.



$$A = \left\{ \frac{y_1}{2} + \frac{y_1+y_2}{2} + \frac{y_2+y_3}{2} + \dots + \frac{y_{n-1}+y_n}{2} + \frac{y_n}{2} \right\} \times a$$

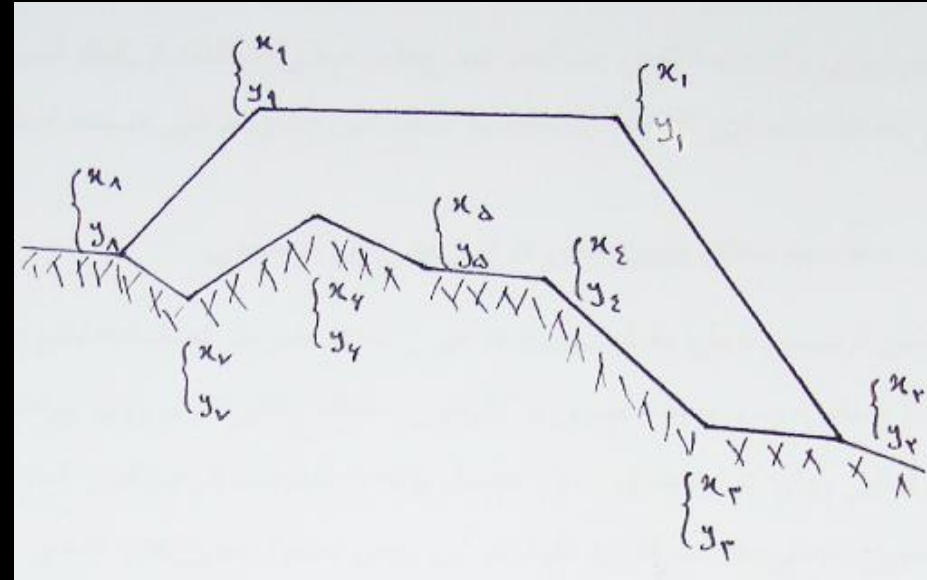
# حجم عملیات خاکی

## ۳. روش مختصات

سطح نیمرخ‌هایی که دارای شکل هندسی نامنظم هستند را می‌توان از این روش محاسبه کرد. در این روش، مختصات هر یک از نقاط توسط نقشه برداری تعیین می‌شود. در این روش سطح نیمرخ را می‌توان به صورت زیر به دست آورد:

برای تعیین مساحت نیمرخ، از یک نقطه دلخواه، کسرهایی به طوری که  $X$  در صورت خط کسری و  $Y$  در مخرج آن و یا برعکس، نوشته می‌شود. بنابراین مساحت نیمرخ عرضی برابر است با نصف مجموع حاصل ضرب اعداد واقع در دو سر خط ممتد (قطر اصلی) منهای مجموع حاصل ضرب اعداد واقع در دو سر خط چین (قطر فرعی). در ضمن تمام نقاط با در نظر گرفتن علامت جبری به کار برده شده و<sup>12</sup> نقطه اول نیز باید در انتها تکرار شود.

# حجم عملیات خاکی



$$A = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & x_6 & x_7 & x_8 & x_9 & x_1 \\ y_1 & y_2 & y_3 & y_4 & y_5 & y_6 & y_7 & y_8 & y_9 & y_1 \end{bmatrix}$$

$$A = \frac{1}{2} \{ [(x_1 \times y_2) + (x_2 \times y_3) + (x_3 \times y_4) + (x_4 \times y_5) + (x_5 \times y_6) + (x_6 \times y_7) + (x_7 \times y_8) + (x_8 \times y_9) + (x_9 \times y_1)] - [(y_1 \times x_2) + (y_2 \times x_3) + (y_3 \times x_4) + (y_4 \times x_5) + (y_5 \times x_6) + (y_6 \times x_7) + (y_7 \times x_8) + (y_8 \times x_9) + (y_9 \times x_1)] \}$$

# حجم عملیات خاکی

## ۴. استفاده از رایانه

بهترین روش برای پیدا کردن مساحت نیمرخ‌های عرضی استفاده از رایانه است. در این روش از نرم‌افزارهای مختلف راه‌سازی که قادر به محاسبه سطح نیمرخ‌های عرضی هستند استفاده می‌شود.

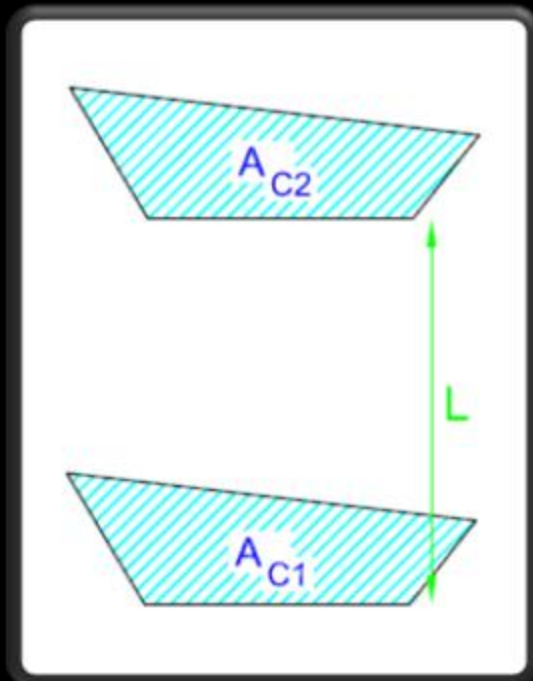
# حجم عملیات خاکی

محاسبه حجم عملیات خاکی بین دو نیمرخ عرضی متوالی در مسیر مستقیم

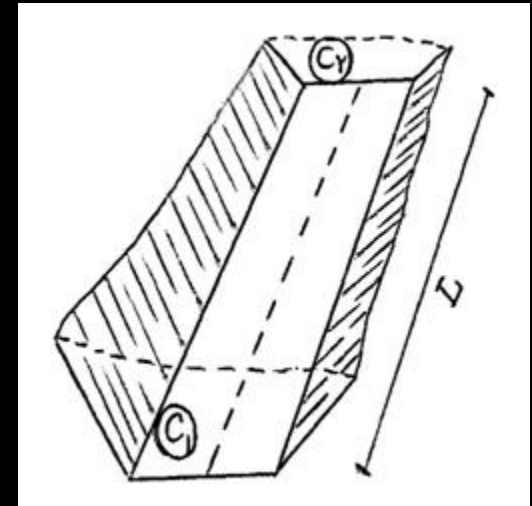
برای محاسبه حجم عملیات خاکی بین دو نیمرخ عرضی در مسیرهای مستقیم حالت‌های مختلف زیر را در نظر گرفته می‌شود:

# حجم عملیات خاکی

**حالت اول:** هر دو نیم رخ عرضی متوالی در خاکبرداری باشند.

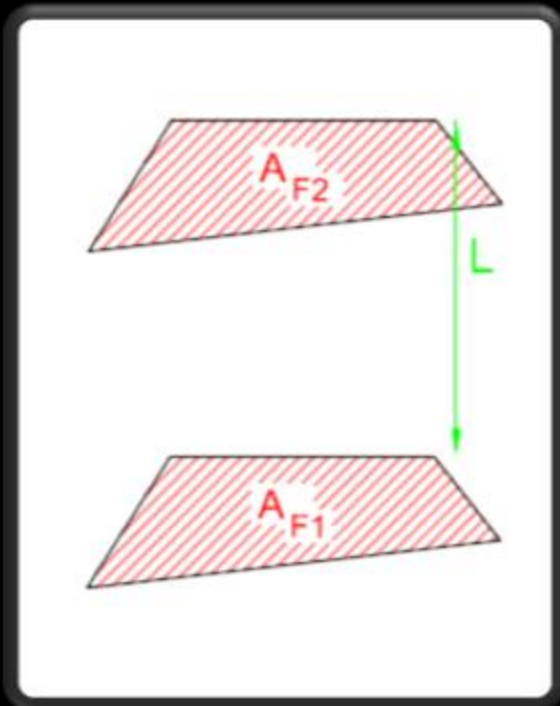


$$V_C = \frac{A_{C1} + A_{C2}}{2} \times L$$

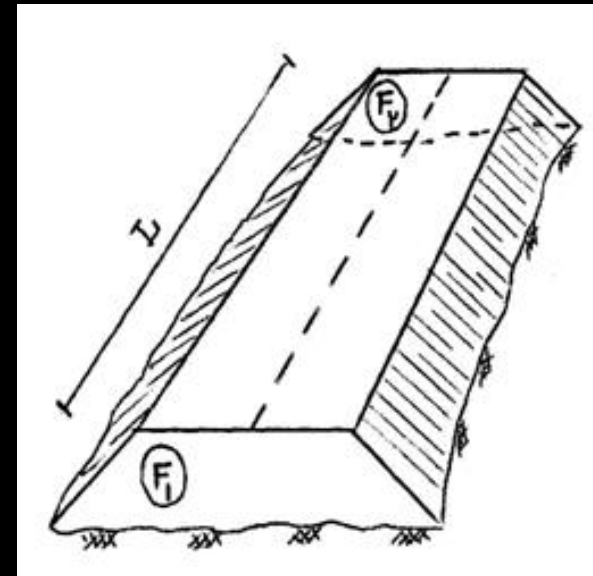


# حجم عملیات خاکی

**حالت دوم:** هر دو نیم رخ عرضی متوالی در خاکریزی باشند.



$$V_F = \frac{A_{F1} + A_{F2}}{2} \times L$$

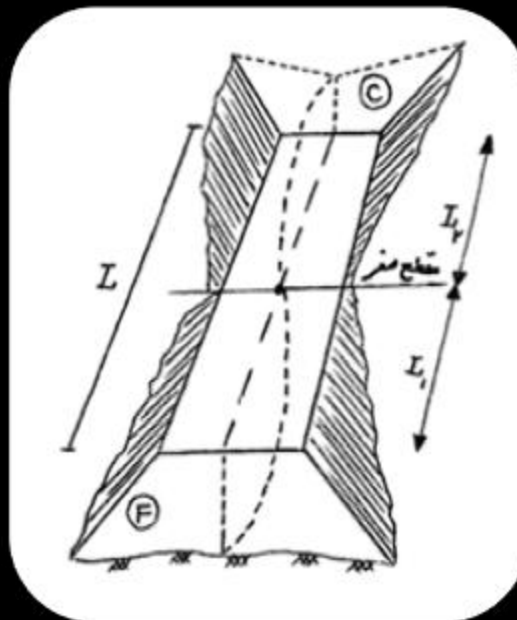
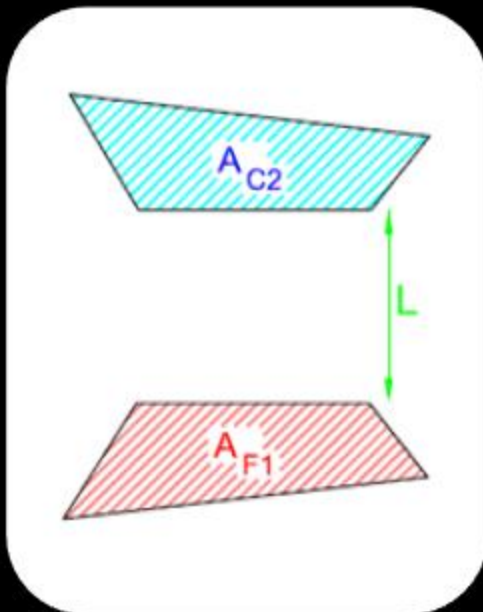




# حجم عملیات خاکی

**حالت سوم:** هر دو نیم‌رخ عرضی متوالی یکی در خاکبرداری و یکی در

خاکریزی باشند.

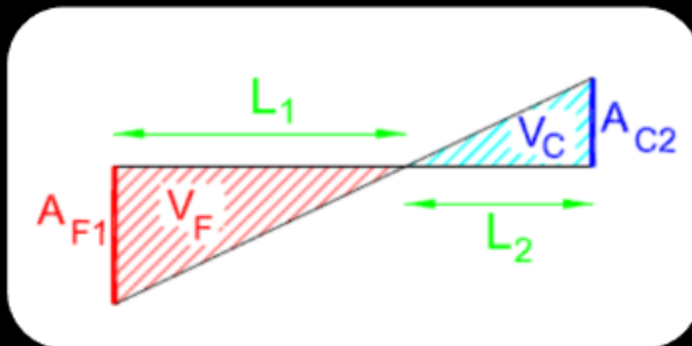


$$l_1 = \frac{A_{F1}}{A_{F1} + A_{C2}} \times L$$

$$l_2 = \frac{A_{C2}}{A_{F1} + A_{C2}} \times L$$

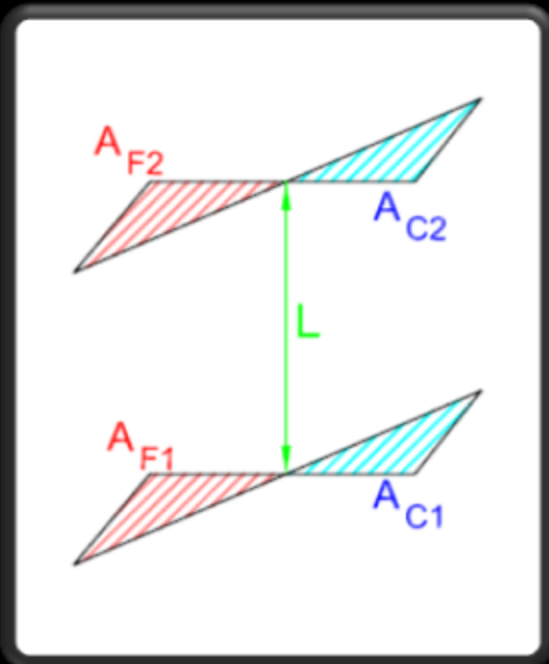
$$V_F = \frac{A_{F1} + 0}{2} \times l_1$$

$$V_C = \frac{0 + A_{C2}}{2} \times l_2$$



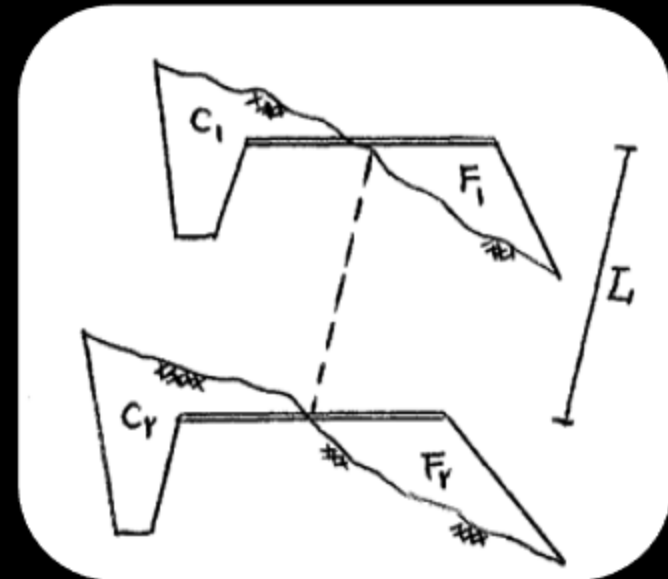
# حجم عملیات خاکی

**حالت چهارم:** هر دو نیم‌رخ عرضی متوالی به طور مشابه هم در خاکبرداری و هم در خاکریزی باشند.



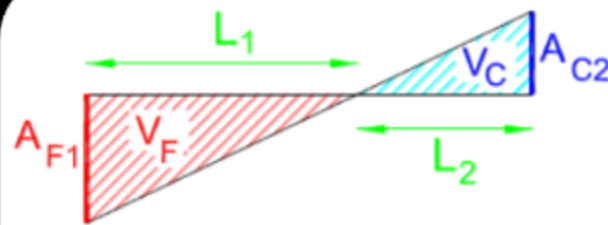
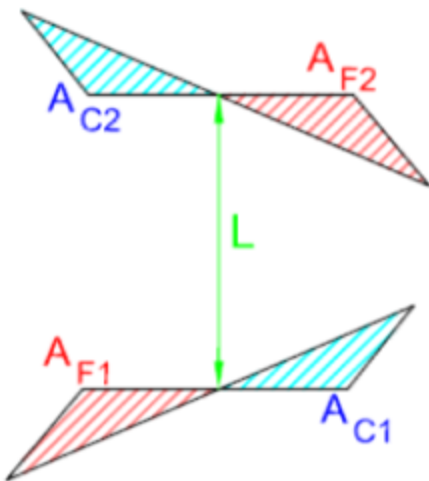
$$V_C = \frac{A_{C1} + A_{C2}}{2} \times L$$

$$V_F = \frac{A_{F1} + A_{F2}}{2} \times L$$

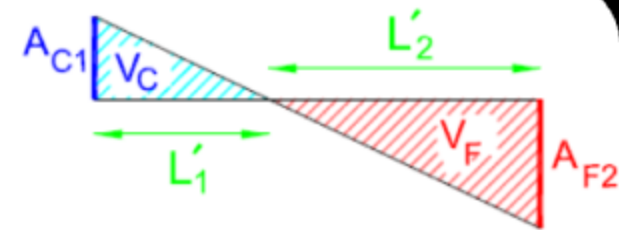


# حجم عملیات خاکی

**حالت پنجم:** هر دو نیم رخ عرضی متوالی به طور غیر مشابه هم در خاکبرداری و هم در خاکریزی باشند.



نیم رخ طولی سمت چپ



نیم رخ طولی سمت راست

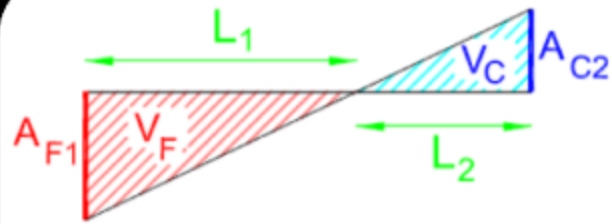
$$L_1 = \frac{A_{C1}}{A_{C1} + A_{F2}} \times L$$

$$L'_1 = \frac{A_{F1}}{A_{F1} + A_{C2}} \times L$$

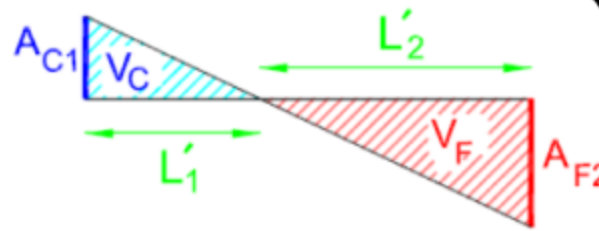
$$L_2 = \frac{A_{F2}}{A_{C1} + A_{F2}} \times L$$

$$L'_2 = \frac{A_{C2}}{A_{F1} + A_{C2}} \times L$$

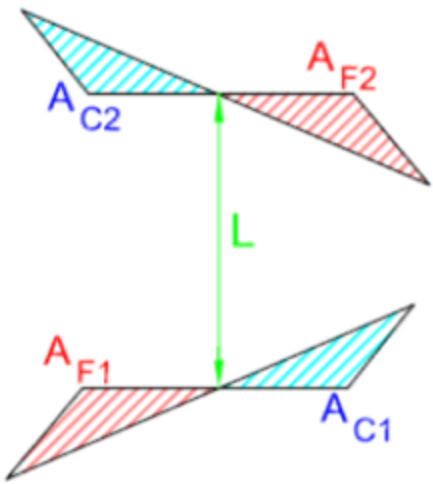
# حجم عملیات خاکی



نیمرخ طولی سمت چپ



نیمرخ طولی سمت راست



$$V_{F1} = \frac{A_{F1}}{2} \times L'_1$$

$$V_{F2} = \frac{A_{F2}}{2} \times L_2$$

$$V_F = V_{F1} + V_{F2}$$

$$V_{C1} = \frac{A_{C1}}{2} \times L_1$$

$$V_{C2} = \frac{A_{C2}}{2} \times L'_2$$

$$V_C = V_{C1} + V_{C2}$$

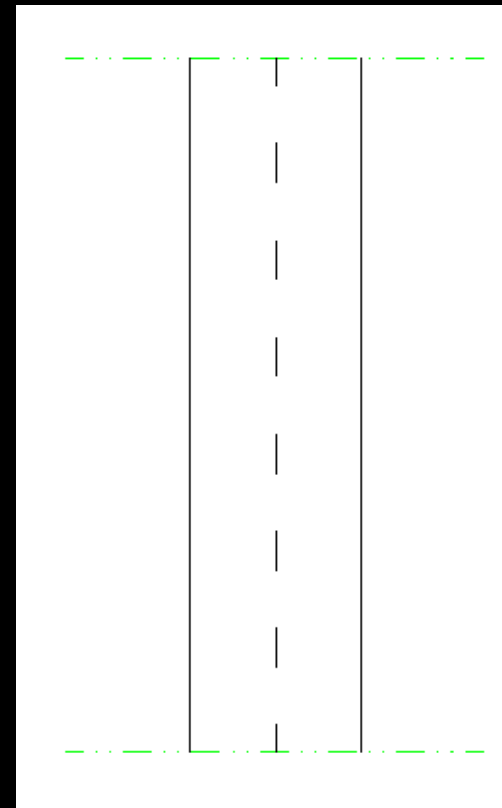
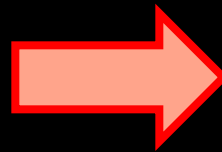
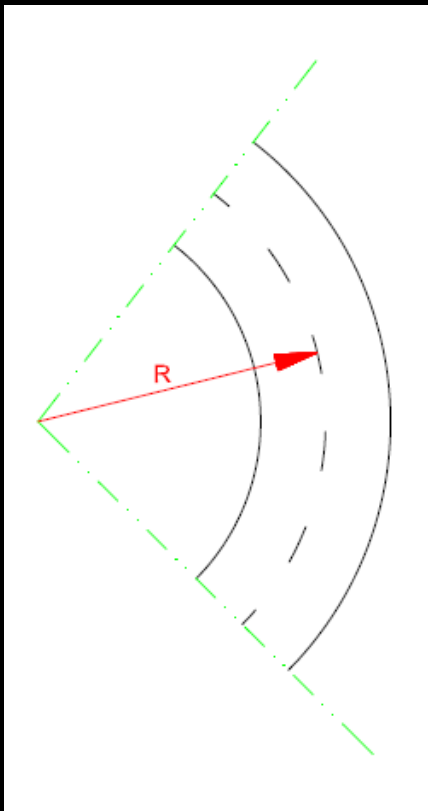
# حجم عملیات خاکی

## محاسبه حجم عملیات خاکی بین دو نیمرخ عرضی متوالی در قوس

برای محاسبه حجم عملیات خاکی در راه‌ها و جاده‌ها، فرض کردن محور به صورت خط مستقیم با خطا همراه است. یکی از مواردی که در آن خطا زیاد بوده و تصحیح در محاسبات لازم به نظر می‌رسد، **تصحیح در قوس‌های افقی** است. در قوس‌های افقی نیمرخ‌های عرضی در امتداد شعاع گرفته می‌شوند، بنابراین حجم حقیقی عملیات خاکی عبارت است از حجم قوسی که بین دو سطح مقطع غیر موازی تشکیل می‌شود.

# حجم عملیات خاکی

اگر از حالت قوسی بودن آن صرف نظر شود و آن را به صورت یک مسیر مستقیم در نظر گرفت، بنابراین شکل فوق به صورت یک حجم منشوری مطابق شکل زیر درمی آید.



# حجم عملیات خاکی

که در آن  $\Delta V$  اختلاف حجم حالت قوسی و مستقیم،  $V_{Curve}$  حجم در حالت قوس و  $V_{True}$  حجم در حالت مستقیم است.

برای محاسبه حجم عملیات خاکی در حالت فوق می توان از قضیه **پاپیوس** و **گلدینوس** استفاده کرد. اگر یک سطح صاف حول یک محور گردش کند، حجم تولید شده به وسیله این گردش برابر است با سطح دوران کننده ضرب در طولی که مرکز ثقل سطح طی می کند. اگر مرکز ثقل قوس **خارج از محور وسط قوس** باشد، حجم حقیقی **بیشتر** از حجمی است که از محاسبه منشوری بدست می آید و اگر مرکز ثقل قوس **داخل محور وسط قوس** باشد، حجم محاسبه شده از راه منشور **بزرگ تر** از حجم حقیقی خواهد بود.

# حجم عملیات خاکی

بنابراین اگر یک قطعه از راه که دارای محوری به طول  $L$  که در قوس واقع شده است مورد بررسی قرار گیرد، حجم حقیقی  $V$  برابر است با حجم منشور در حالت مستقیم به اضافه یا منهای اختلاف حجم ( $\Delta V$ ).

$$V_{\text{Curve}} = V_{\text{True}} \pm \Delta V$$



# حجم عملیات خاکی

بنابراین اگر  $A_1$  و  $A_2$  سطح مقطع نیمرخ‌ها و  $e_1$  و  $e_2$  خروج از مرکزیت آن‌ها باشد و همچنین  $L$  طول قوس دایره‌ای به شعاع  $R$  و  $L_1$  نیز طول قوس دایره‌ای به شعاع  $(R+e)$  باشد، می‌توان نوشت:

$$V_{\text{True}} = \frac{L}{2} (A_1 + A_2)$$

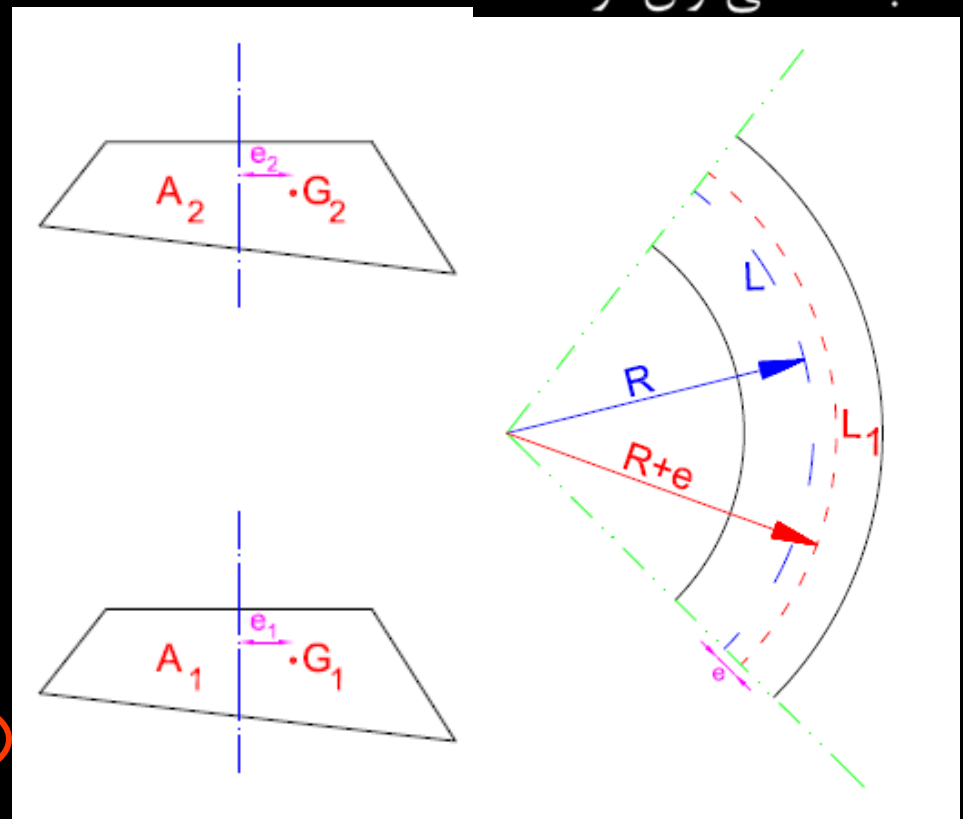
$$L_1 = \left( \frac{R+e}{R} \right) L$$

$$\Delta V = A(L_1 - L)$$

$$= A \left( \left( \frac{R+e}{R} \right) L - L \right)$$

$$= \frac{L}{R} (Ae)$$

$$\Delta V = \pm \frac{L}{2R} (A_1 e_1 + A_2 e_2)$$



# حجم عملیات خاکی

## محاسبه حجم عملیات خاکی در پروژه

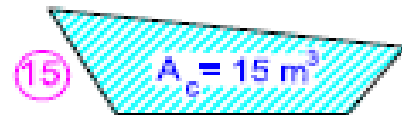
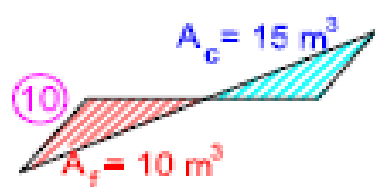
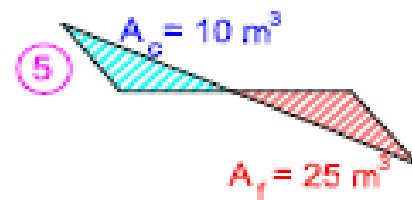
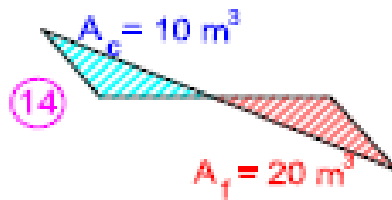
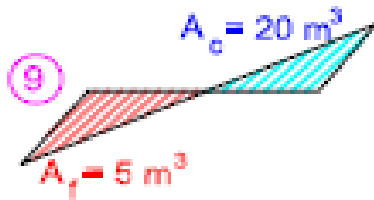
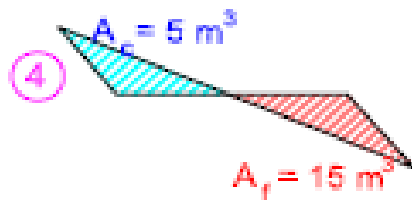
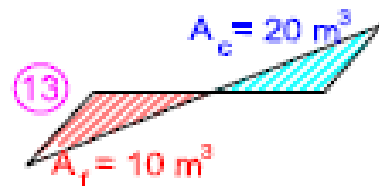
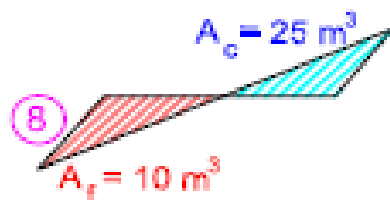
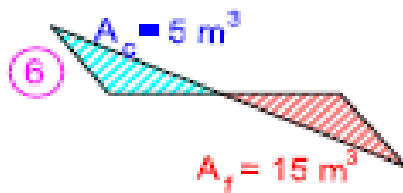
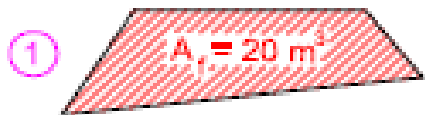
به منظور محاسبه احجام خاکریزی و خاکبرداری واقع بین کلیه مقاطع عرضی مسیر و دستیابی به حجم کل عملیات خاکی پروژه، جدولی مطابق جدول صفحه بعد تنظیم می شود. در این جدول با معلوم بودن سطح مقاطع عرضی و فاصله بین آنها، می توان **احجام خاکریزی و خاکبرداری** بین دو مقطع متوالی را محاسبه نمود (ستون های ۶ و ۷). علاوه بر این با اعمال ضرایب مناسب می توان اثر کاهش حجم خاک ناشی از **انقباض** (مربوط به عملیات خاکریزی) و یا اثر افزایش حجم خاک ناشی از **تورم** (مربوط به عملیات خاکبرداری) را در محاسبات لحاظ کرد (ستون های ۱ و ۹).

# حجم عملیات خاکی

در مرحله بعد با در نظر گرفتن این موضوع که حجم خاکریز مورد نیاز بین دو نیمرخ متوالی در صورت امکان از حجم خاکبرداری مربوط به همان دو نیمرخ تامین می گردد، می توان **اضافه حجم عملیات** موجود بین دو مقطع را با در نظر گرفتن علامت جبری (مثبت برای خاکبرداری و منفی برای خاکریزی) به دست آورد (ستون های ۱۰ و ۱۱). به این ترتیب جمع جداگانه اعداد ستون های فوق، مشخص خواهد نمود که کل عملیات خاکی پروژه شامل چه میزان خاکبرداری خاکریزی بوده و با مقایسه این مقادیر نیاز پروژه به محل قرضه یا دپو تعیین می گردد. و در نهایت جمع جبری احجام تا نیمرخ مورد نظر را می توان در **ستون ۱۲** مشاهده کرد که از این ستون برای **ترسیم منحنی بروکنر** استفاده می شود.

جدول احجام عملیات خاکی (جدول پرواکتر)

جمع جبری احجام تا تیغخ مورد نظر	انزاقه حجری		حجم خاکریزی + ۲۰٪ انقباض	حجم خاکبرداری + ۵٪ تورم	حجم خاکریزی (مترمکعب)	حجم خاکبرداری (مترمکعب)	حجم فاصله تیغخ ها	سطح خاکریزی (مترمربع)	سطح خاکبرداری (مترمربع)	کیلومتر از	شماره ایستگاه
	خاکریزی -	خاکبرداری +									
0								20	0	0+000	1
-1050	-1050		1050	0	875	0	50	15	0	0+050	2
-144.2308		905.769	103.8462	1009.615	86.53848	961.5385	50	0	50	0+100	3
1195.673		1339.9	103.8462	1443.75	86.53848	1375	50	15	5	0+150	4
389.4231	-806.25		1200	393.75	1000	375	50	25	10	0+200	5
-416.8269	-806.25		1200	393.75	1000	375	50	15	5	0+250	6
-1284.014	-867.188		900	32.8125	750	31.25	50	15	0	0+300	7
-1623.858	-339.844		750	410.1563	625	390.625	50	10	25	0+350	8
-892.6082		731.25	450	1181.25	375	1125	50	5	20	0+400	9
-423.8582		468.75	450	918.75	375	875	50	10	15	0+450	10
-98.85817		325	200	525	166.7	500	50	0	5	0+500	11
294.8918		393.75	0	393.75	0.0	375	50	0	10	0+550	12
932.3918		637.5	150	787.5	125.0	750	50	10	20	0+600	13
876.14	-56.25		450	393.75	375.0	375	50	20	10	0+650	14
1189.53		313.393	342.8571	656.25	285.7	625	50	0	15	0+700	15
	-3925.78	5115.3	7350.5	8540.1	جمع						



# حجم عملیات خاکی

## حمل خاک

در پروژه های راه سازی نیمرخ های عرضی مختلفی اعم از خاکبرداری و خاکریزی وجود دارد و همواره لازم است تا خاک از نقاط مختلفی از پروژه **برداشته شده** و به نقاط دیگری از آن **ریخته شود**. این جابه جایی که در اصطلاح **حمل خاک** نامیده می شود، از نظر اقتصادی بسیار حائز اهمیت است. نحوه جابه جایی خاک بین نقاط مختلف مسیر باید به گونه ای سازماندهی شود که متوسط فاصله حمل خاک در کل پروژه حداقل گردد.

# حجم عملیات خاکی

## فاصله حمل خاک

انتقال خاک از خاکبرداری به خاکریزی، تامین خاک مورد نیاز از قرضه و همچنین انتقال خاک مازاد به دپوها، همه نیاز به حمل دارند. از طرفی پرداخت هزینه عملیات خاکی به پیمانکار که بر مبنای مترمکعب خاک انجام می گیرد، در صورت تجاوز فاصله حمل از فاصله تعیین شده در قرارداد، شامل اضافه هزینه حمل خواهد شد. بنابراین تعیین **فاصله حمل خاک** پارامتری بسیار مهم در محاسبات عملیات خاکی است.

# حجم عملیات خاکی

برای پیدا کردن حداقل فاصله متوسط حمل خاک، روش های مختلفی وجود دارد که در میان آنها دو روش **لالان (Lalan)** و **بروکنر (Bruckner)** کاربرد بیشتری دارند.

اساس هر دو روش تقریباً یکسان است با این تفاوت که روش لالان سریع تر و ساده تر از روش بروکنر بوده ولی روش **بروکنر دقیق تر** است.



# منحنی بروکنر

## هدف از ترسیم منحنی بروکنر:

دستیابی به *اقتصادی ترین نحوه جابه جایی خاک* و تعیین حداقل فاصله متوسط حمل. به عبارت دیگر منحنی بروکنر به این پرسش پاسخ می دهد که خاک مورد نیاز برای خاکریزی از کدام نقطه تهیه شود و خاک حاصل از خاکبرداری به کدام نقطه منتقل گردد تا حمل خاک *کمترین فاصله* را داشته باشد و در نتیجه *هزینه حمل خاک حداقل* گردد.

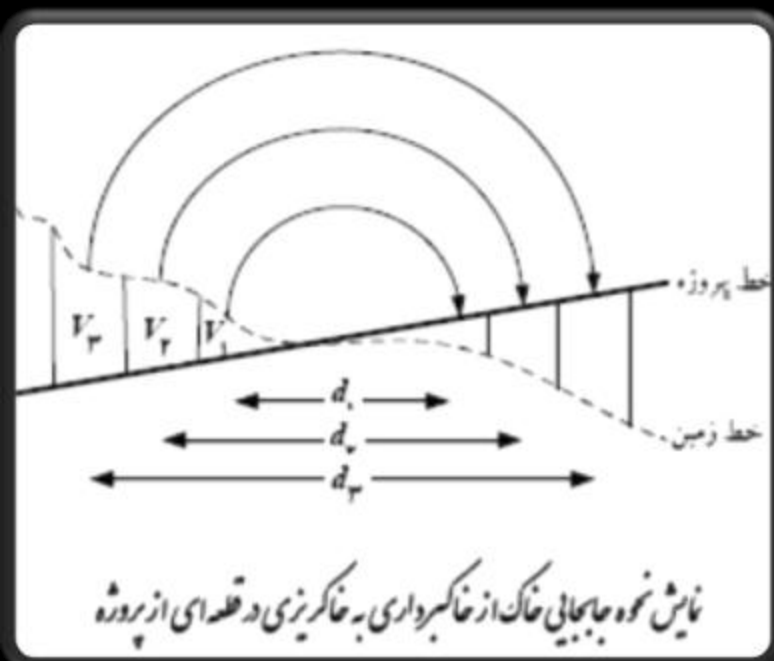
# عزم حمل و فاصله متوسط حمل

حاصل ضرب حجم خاک در فاصله جابه جایی آن را از دیدگاه فیزیکی می توان به صورت یک کار مکانیکی در نظر گرفت که در اصطلاح **عزم حمل** یا لنگر حمل نامیده می شود.

بنابراین در صورتی که مجموع عزم حمل های جزء را که به آن عزم حمل کل گفته می شود، بر مجموع حجم های جابه جا شده تقسیم کنند، **فاصله حمل متوسط** خاک به

دست می آید:

$$\bar{d} = \frac{\sum V_i \times d_i}{\sum V_i}$$



نمایش نحوه جابجایی خاک از خاکبرداری به خاکریزی در قطعی از پروژه

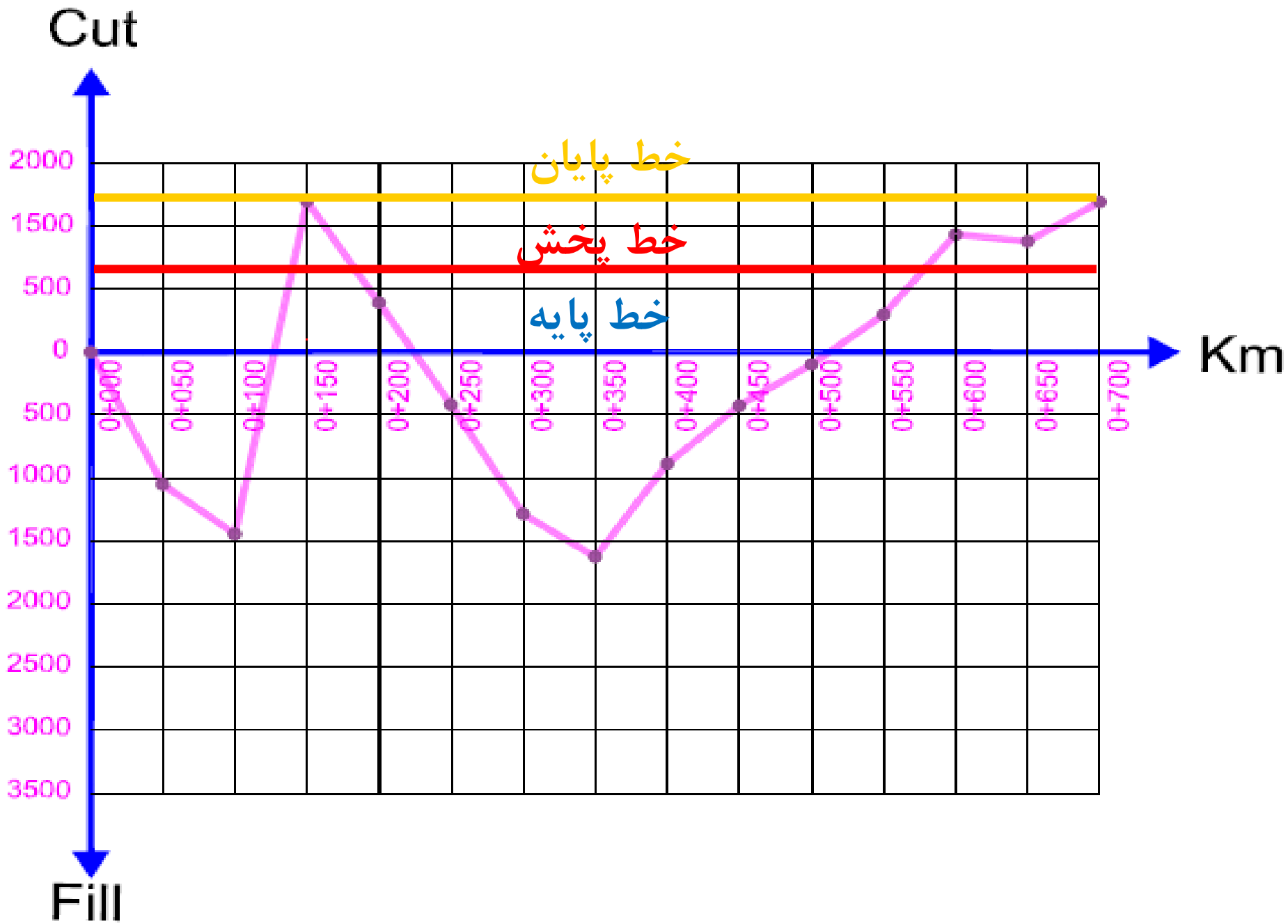
## منحنی بروکنر

هر چه فاصله حمل متوسط خاک کمتر باشد، هزینه عملیات خاکی پروژه نیز کمتر می شود. بر اساس رابطه فاصله حمل متوسط، تنها یک راه حل برای حداقل نمودن فاصله حمل متوسط وجود دارد و آن کاهش صورت کسر و یا عزم حمل کل خواهد بود.

لازم به یادآوری است که مخرج کسر و یا حجم عملیات خاکی در یک پروژه **مقداری ثابت** است و تنها با تغییر مسیر راه و یا تغییر خط پروژه، می توان این حجم را تغییر داد.

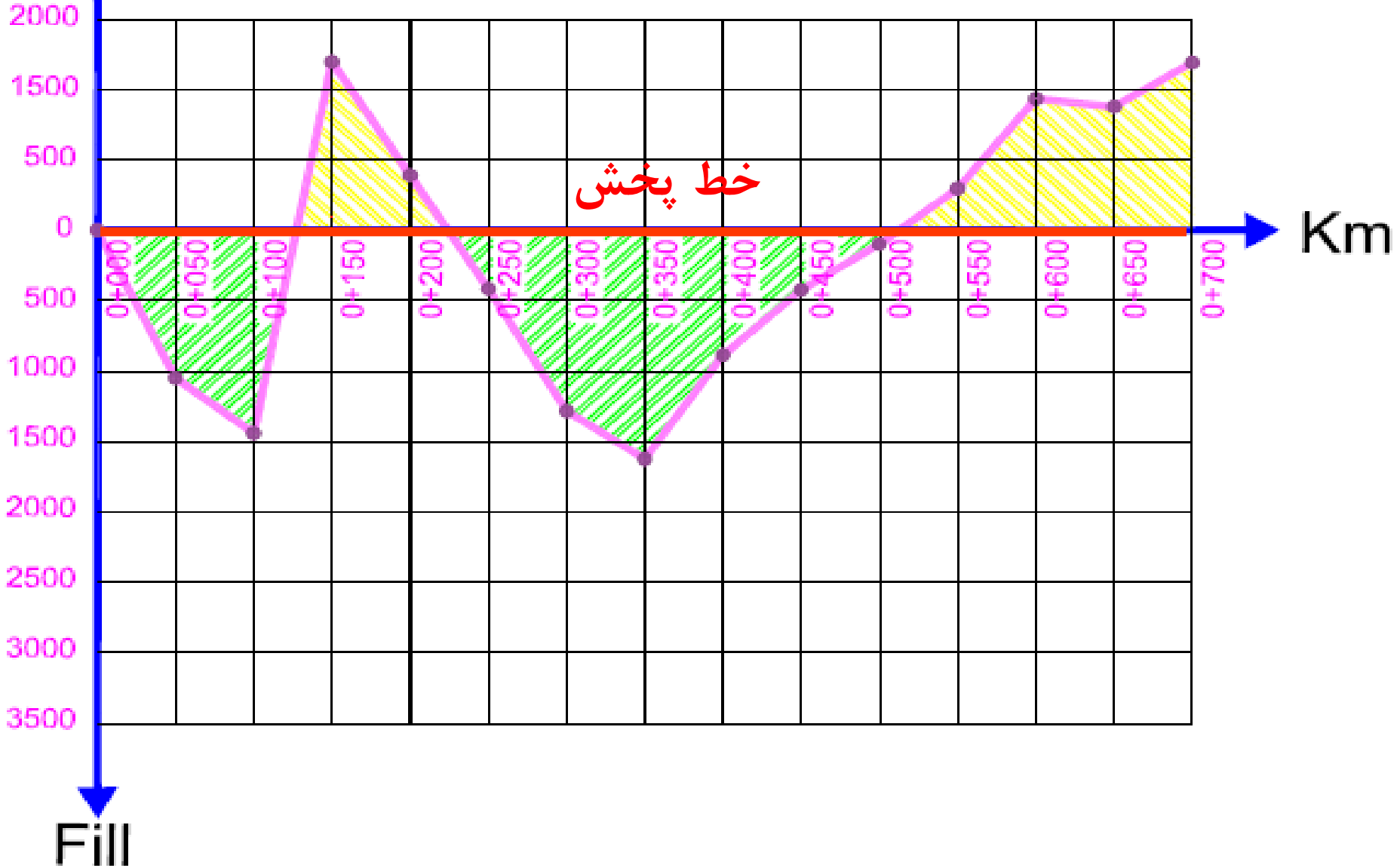
# منحنی بروکنر

برای رسم منحنی بروکنر می توان **کیلومتر از مقاطع عرضی** (اعداد ستون ۲ جدول احجام عملیات خاکی) را **روی محور افقی** و **جمع جبری** ارایه شده در ستون ۱۲ را **بر روی محور عمودی** پیاده نمود. مقیاس محور افقی منحنی بروکنر مشابه پروفیل طولی مسیر برابر ۱:۲۰۰۰ انتخاب می شود و مقیاس محور عمودی آن متناسب با تغییرات اعداد ستون ۱۲ جدول احجام، ممکن است متغیر باشد.



Cut

عزم حمل: عبارت است از سطح محصور بین منحنی بروکنر و خط پخش



# نکات مهم

۱- **خط پایه:** به محور افقی که همان کیلومتر از مسیر است، خط پایه یا خط پایه گفته می شود.

۲- **علایم قراردادی:** جهت مثبت محور عمودی بیانگر عملیات خاکبرداری و جهت منفی آن بیانگر عملیات خاکریزی است. بنابراین طول شاخه های صعودی منحنی بروکنر، محدوده عملیات خاکبرداری و طول شاخه های نزولی آن محدوده عملیات خاکریزی را مشخص می کند. همچنین مجموع ارتفاع شاخه های صعودی منحنی بروکنر، حجم کل عملیات خاکبرداری و مجموع ارتفاع شاخه های نزولی آن حجم کل عملیات خاکریزی را نشان می دهد.

۳- **نقاط بیشینه و کمینه:** نقاطی هستند که عملیات خاکبرداری به خاکریزی (یا برعکس) تبدیل می شود. این نقاط بیشتر در محل برخورد خط پروژه با خط زمین (مقطع عرضی صفر یا در مواردی مقطع عرضی مختلط) قرار می گیرند.

۴- **خط پایان:** به خطی که از انتهای منحنی بروکنر و به موازات خط پایه رسم گردد، خط پایان گفته می شود. موقعیت این خط می تواند بر حسب مورد، در بالا یا پایین خط پایه باشد.



۴-۱- اگر خط پایان در بالای خط پایه قرار گیرد، اضافه حجم عملیات خاکی پروژه از نوع خاکبرداری بوده و پروژه نیازمند دیو است.

۴-۲- اگر خط پایان در پایین خط پایه قرار گیرد، اضافه حجم عملیات خاکی پروژه از نوع خاکریزی بوده و پروژه نیازمند قرضه است.

۴-۳- اگر خط پایان منطبق بر خط پایه باشد، حجم عملیات خاکبرداری و خاکریزی کل پروژه با هم در **تعدادل** است.

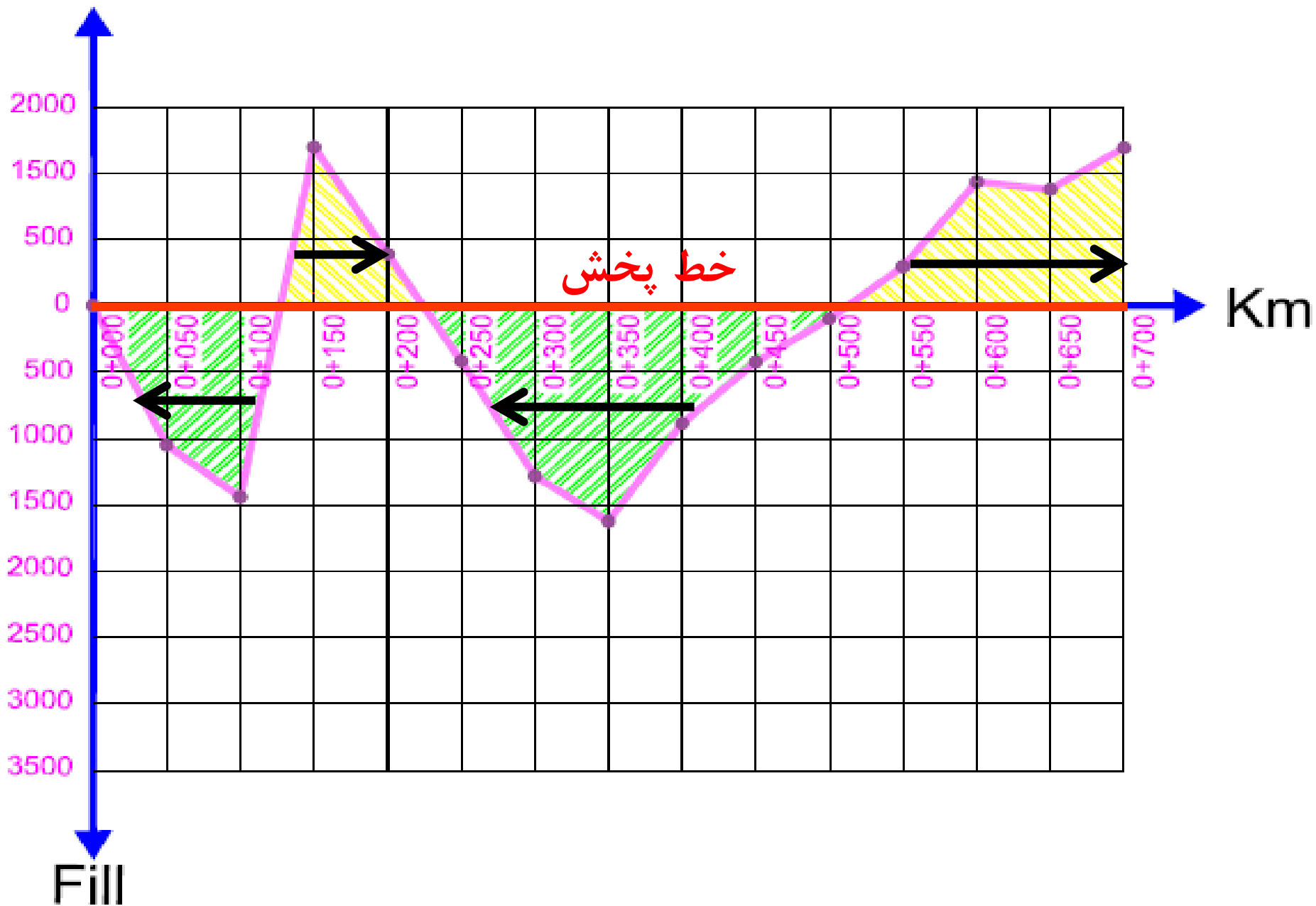
**۵- نقاط تعادل:** نقاطی که منحنی بروکنر خط پایه را قطع می کند، نقاط تعادل نامیده می شود؛ زیرا جمع جبری احجام خاکبرداری و خاکریزی در این نقاط برابر صفر است. به عبارت دیگر در هر سطح محصور بین منحنی بروکنر و خط پایه، مقدار خاکبرداری با خاکریزی برابر است.

**۶- خط پخش:** هر خطی که به موازات خط پایه رسم شود و منحنی بروکنر را در حداقل در یک نقطه قطع کند، خط توزیع یا خط پخش نامیده می شود. با این تعریف خط پایه و خط پایان هم می توانند به عنوان یک خط پخش محسوب شوند.

## نکات مهم

۷- هر خط پخش مفروض، منحنی بروکنر را به مجموعه ای از سطوح هندسی که در بالا و پایین این خط واقع شده اند، تقسیم می کند. همان طور که ملاحظه می شود هر یک از سطوح بسته واقع بین منحنی بروکنر و خط پخش مفروض، دارای یک شاخه صعودی و یک شاخه نزولی هم ارتفاع هستند. به این ترتیب می توان طول پروژه را به صورت قطعاتی در نظر گرفت که به لحاظ حجم خاکبرداری و خاکریزی در تعادل قرار دارند و باید خاک را از سمت شاخه صعودی (خاکبرداری) هر قطعه به سمت شاخه نزولی (خاکریزی) آن حمل نمود. با رعایت این اصل، هر خط پخش مفروض، شیوه ای را برای جابه جایی خاک پیشنهاد می کند و جهت جابه جایی خاک در سطوح بالای خط پخش از چپ به راست و در سطوح زیر خط پخش از راست به چپ خواهد بود.

Cut

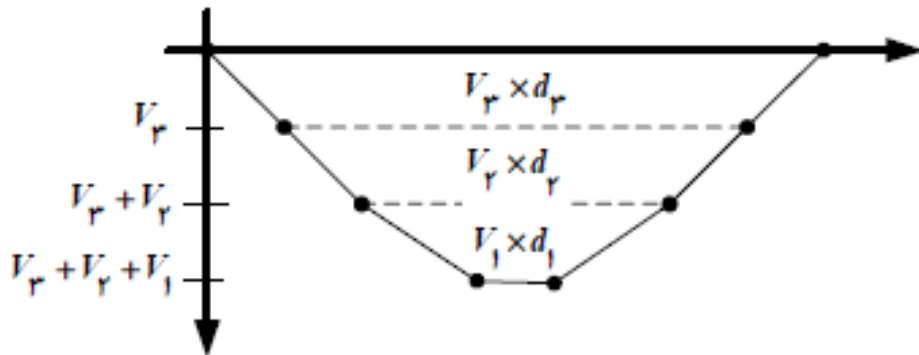
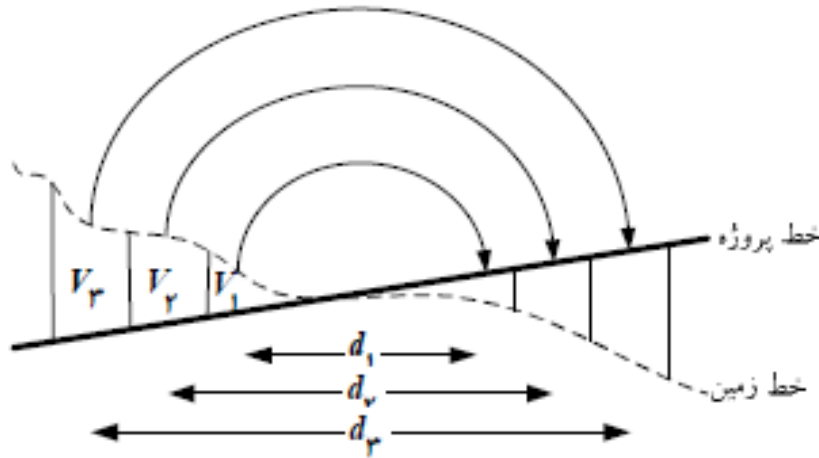


۱- **خط پخش بهینه:** مسلم است که با تغییر خط پخش، مرزهای جابه جایی خاک و فاصله حمل متوسط خاک تغییر می کند. از این رو می توان انتظار داشت که به ازای یک خط **پخش بهینه**، متوسط فاصله حمل خاک حداقل گردد. در ادامه خواهیم دید که اگر **مجموع قاعده های سطوح بالای خط پخش با مجموع قاعده های سطوح زیر خط پخش** برابر باشند، خط پخش مفروض، **بهینه** خواهد بود و در صورت جابه جایی خاک مطابق با الگوی ارائه شده توسط خط پخش بهینه، **متوسط فاصله حمل خاک حداقل** می شود.

# روش های ترسیم خط پخش بهینه

مطابق شکل، منحنی بروکنر قطعه ای از پروژه را که به لحاظ احجام عملیات خاکبرداری و خاکریزی در تعادل است، در زیر پروفیل طولی آن رسم می کنیم. همانطور که ملاحظه

می شود:

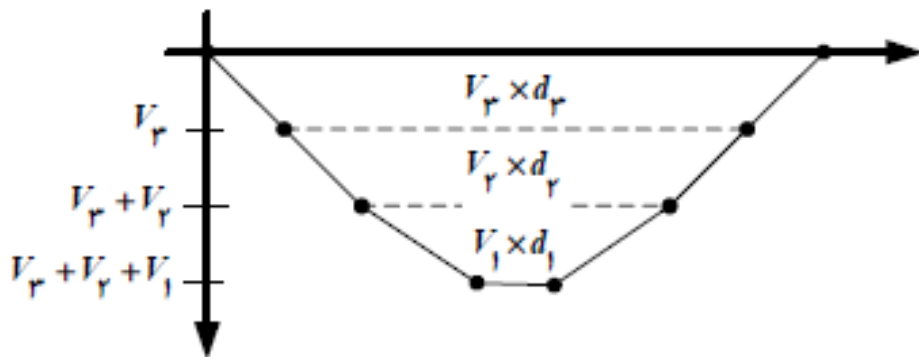
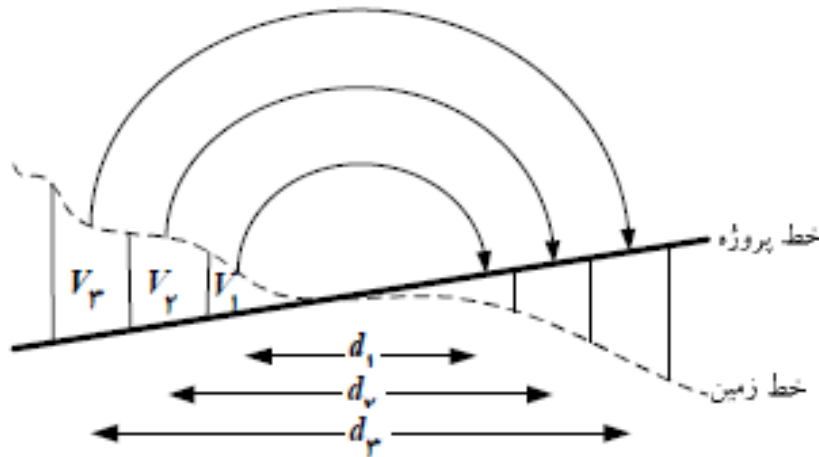


➤ سطح واقع بین منحنی بروکنر و خط پخش مفروض (که در اینجا منطبق بر خط پایه است) برابر با عزم حمل خاک در قطعه مورد نظر است.

# روش های ترسیم خط پخش بهینه

مطابق شکل، منحنی بروکنر قطعه ای از پروژه را که به لحاظ احجام عملیات خاکبرداری و خاکریزی در تعادل است، در زیر پروفیل طولی آن رسم می کنیم. همانطور که ملاحظه

می شود:



➤ ارتفاع سطح واقع بین منحنی بروکنر و خط پخش مفروض، برابر با حجم عملیات خاکی در قطعه مورد نظر است.

# روش های ترسیم خط پخش بهینه

استفاده از این نکات در فرمول ارایه شده برای متوسط فاصله حمل خاک، این نتیجه را به همراه خواهد داشت که برای **حداقل شدن فاصله حمل متوسط خاک** باید **عزم حمل کل** یا **مجموع مساحت های سطوح** واقع بین منحنی بروکنر و خط پخش مفروض حداقل شود. زیرا حجم کل عملیات خاکی پروژه، مقداری ثابت است و بنابراین مجموع ارتفاع سطوح واقع بین منحنی بروکنر و خطوط پخش مختلف، همواره ثابت می ماند.

در چنین شرایطی طبق یک قضیه هندسی، حداقل مجموع مساحت ها در صورتی حاصل می شود که **مجموع قاعده های سطوح بالای خط پخش** با **مجموع قاعده های سطوح زیر خط پخش** برابر باشند.



# روش های ترسیم خط پخش بهینه

با رعایت این اصل می توان خط پخش بهینه را ترسیم نمود، اما باید توجه داشت که این روش برای زمانی مناسب است که در طول پروژه محدودیتی برای محل های قرضه و دیپو وجود نداشته باشد. زیرا در غیر این صورت، موقعیت خط پخش بهینه به محل قرضه یا دیپوهای موجود در طول پروژه نیز بستگی دارد و بر حسب مورد ممکن است یکی از حالت های زیر ایجاد شود:

# حالت های مختلف موقعیت خط پخش

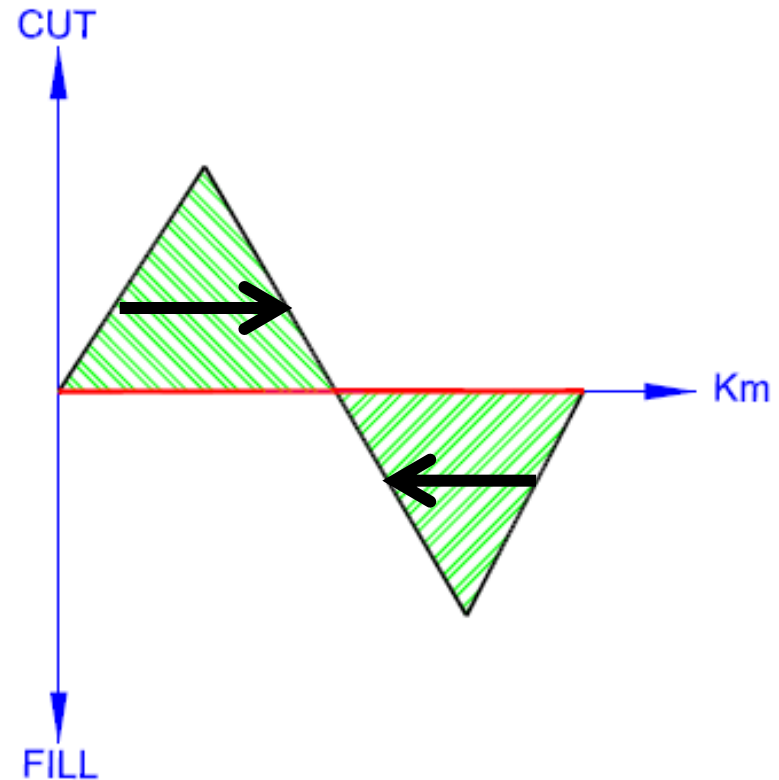
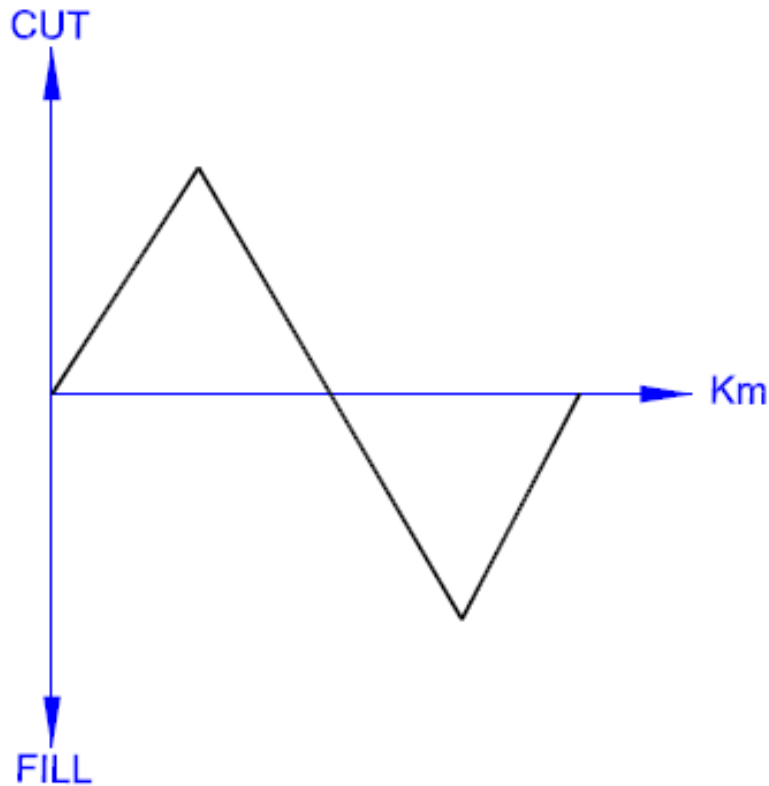
الف- بدون در نظر گرفتن معدن قرضه و دیو

(محدودیتی برای محل های قرضه و دیو وجود ندارد):

# حالت های مختلف موقعیت خط پخش

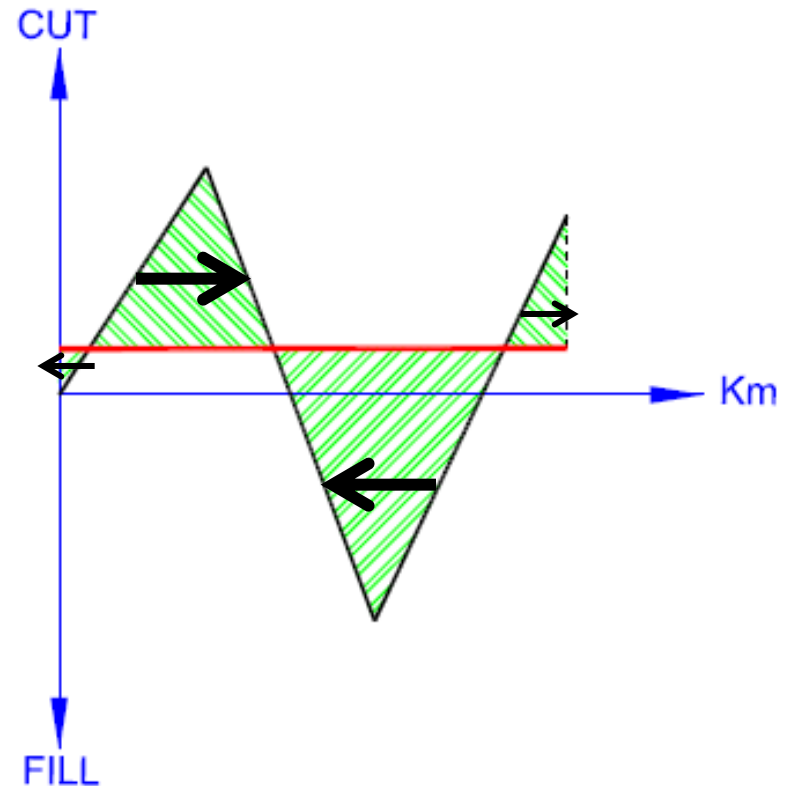
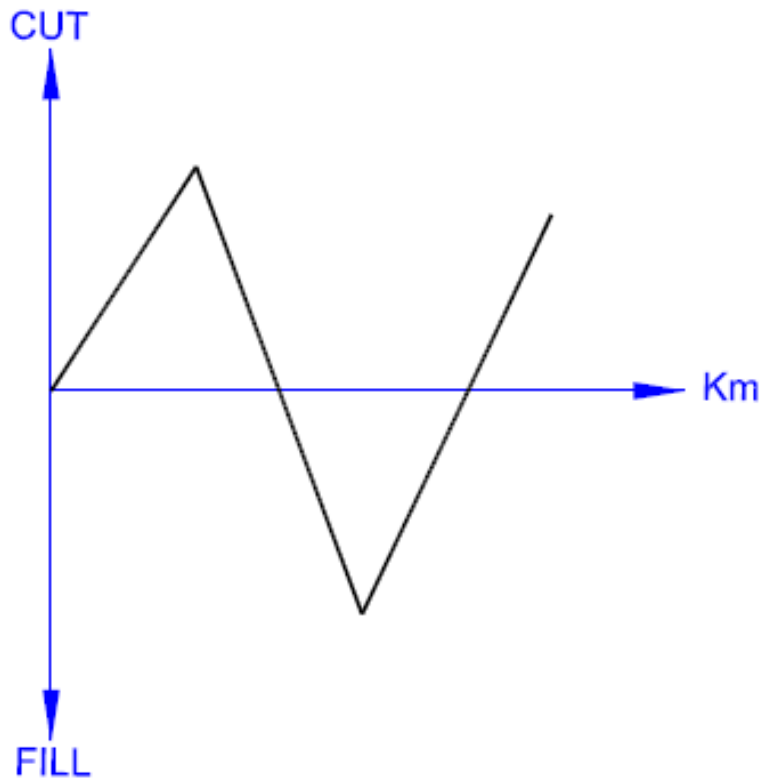
**حالت اول:** در صورتی که منحنی بروکنر به صفر ختم شود.

در این حالت بهترین خط پخش همان خط پایه است.



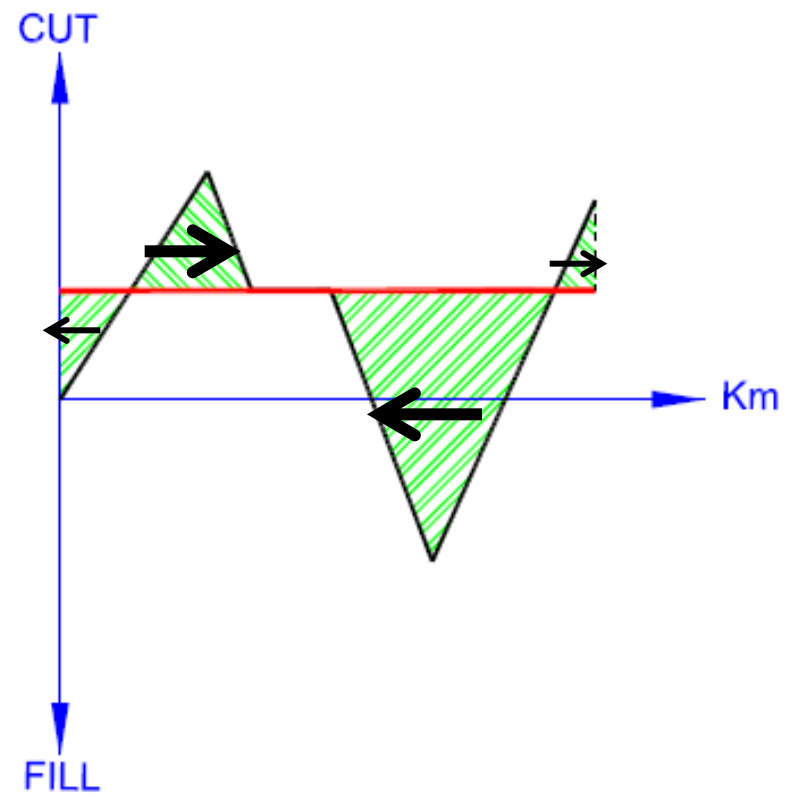
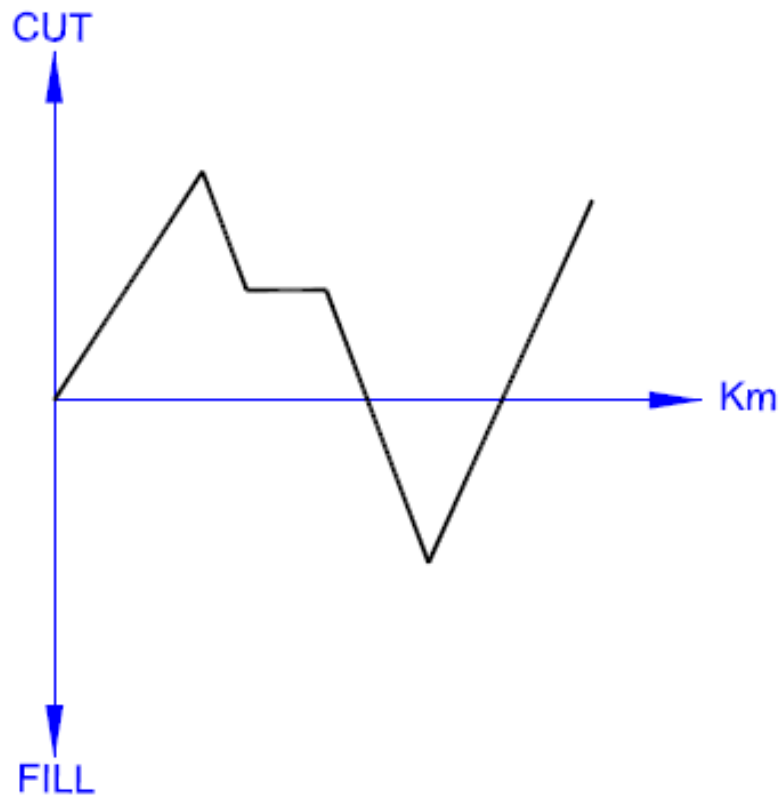
# حالت های مختلف موقعیت خط پخش

**حالت دوم:** در صورتی که منحنی بروکنر به صفر ختم نشود.  
در این حالت بهترین خط پخش بین خط پایه و خط پایان است.



# حالت های مختلف موقعیت خط پخش

**تبصره حالت دوم:** در صورتی که در منحنی بروکنر خط افقی وجود داشته باشد.  
در این حالت بهترین خط پخش منطبق بر خط افقی است.



# حالت های مختلف موقعیت خط پخش

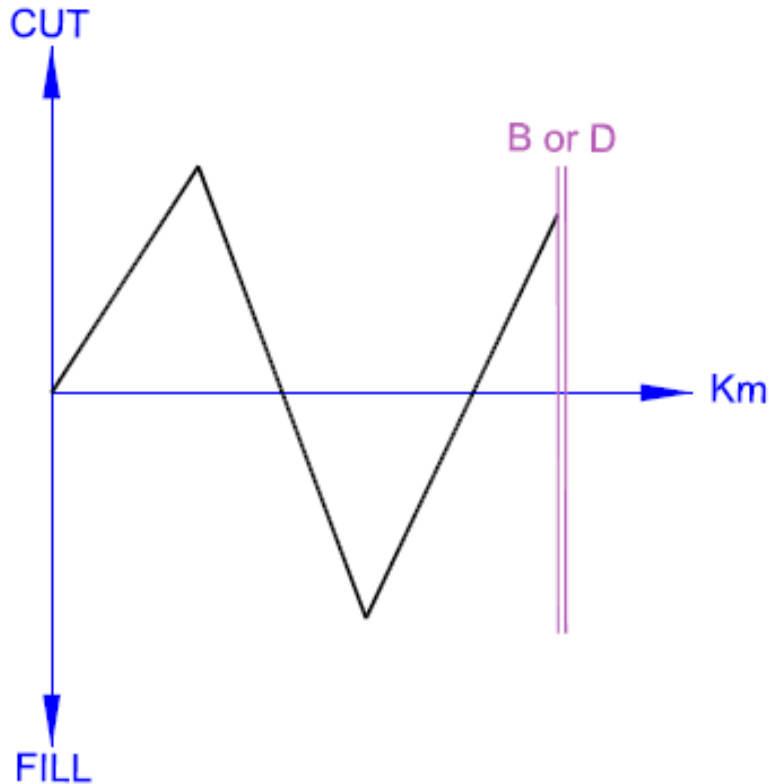
ب- با در نظر گرفتن معدن قرضه و دیو

(برای محل های قرضه و دیو محدودیت وجود دارد):

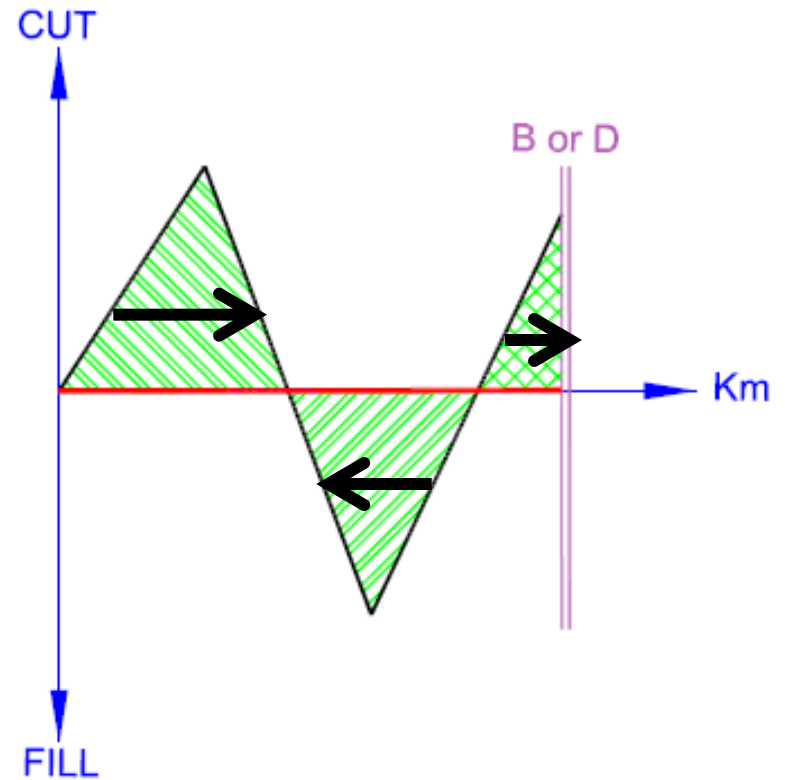
# حالت های مختلف موقعیت خط پخش

**حالت اول:** معدن قرضه یا دپو در پایان مسیر قرار داشته باشد.

در این حالت بهترین خط پخش همان خط پایه است.



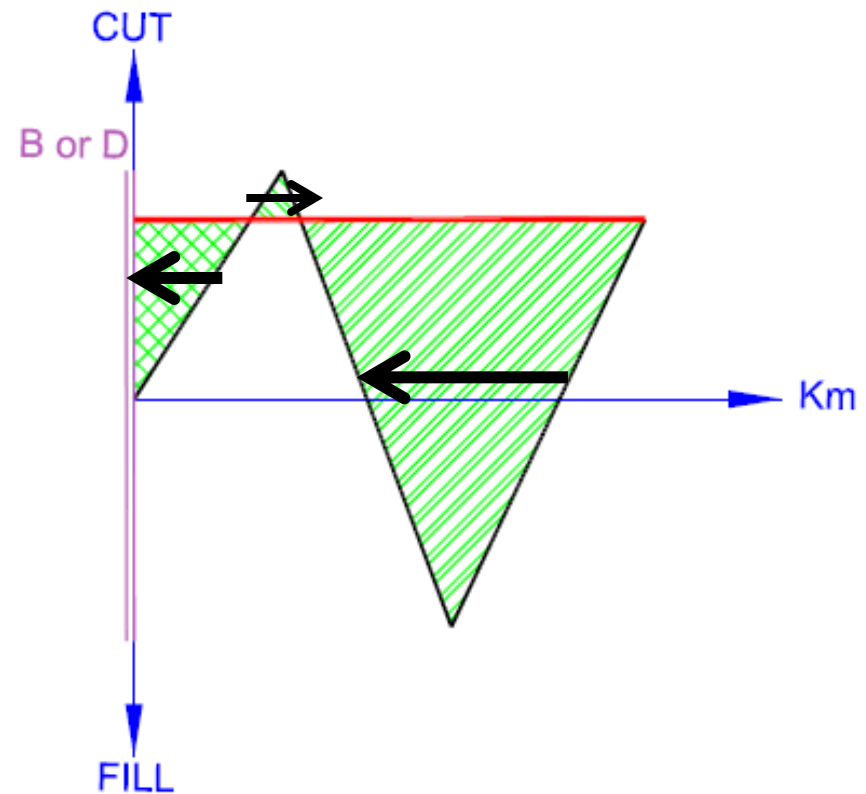
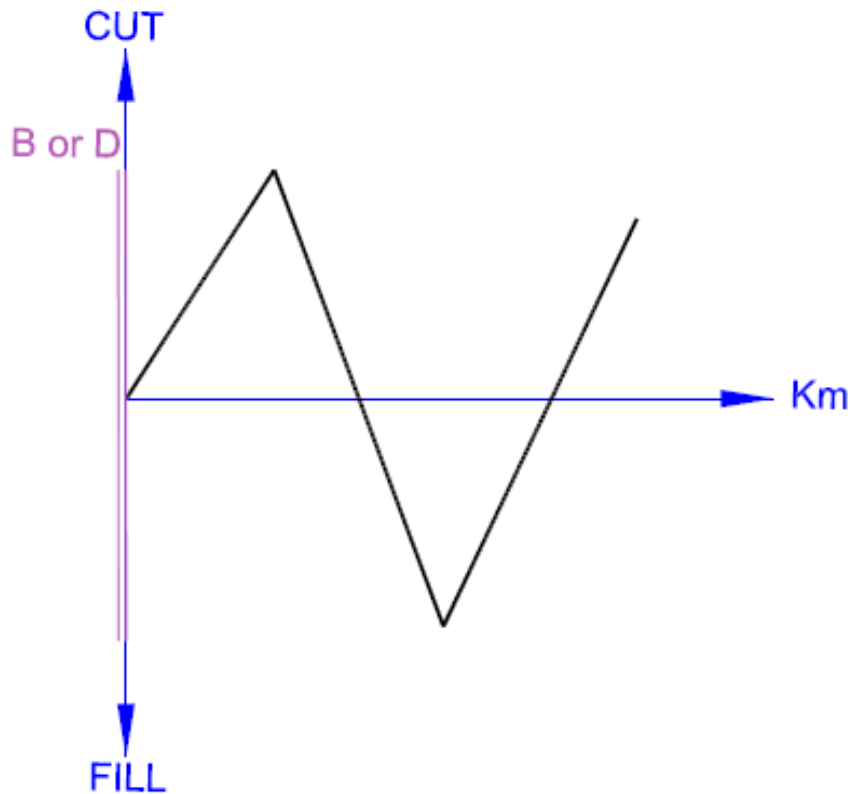
56



# حالت های مختلف موقعیت خط پخش

**حالت دوم:** معدن قرضه یا دیو در ابتدای مسیر قرار داشته باشد.

در این حالت بهترین خط پخش همان خط پایان است.

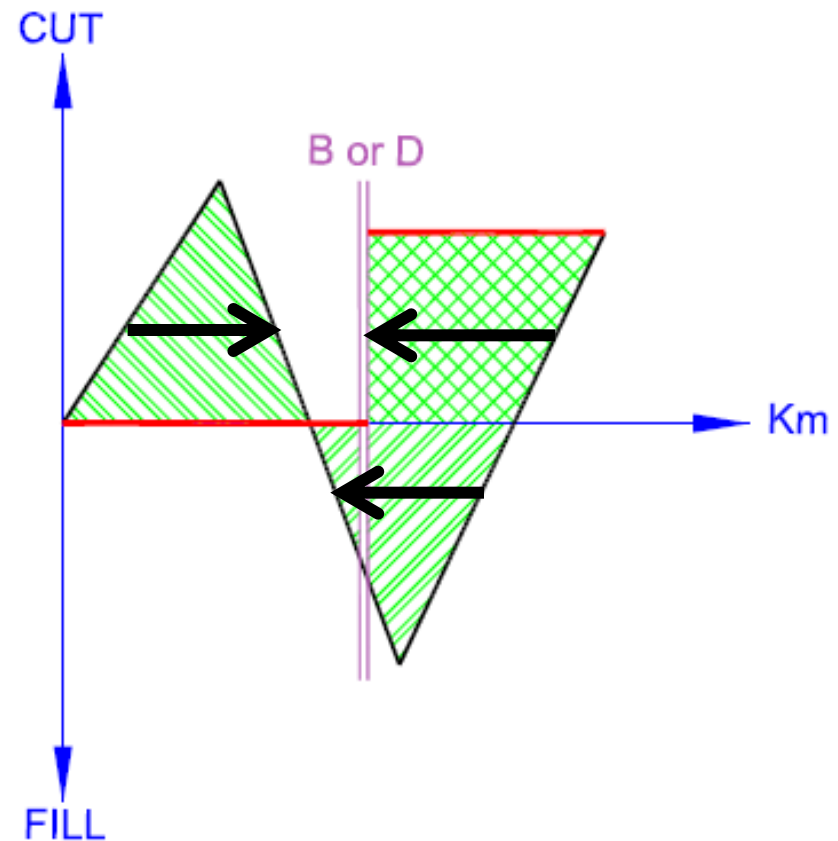
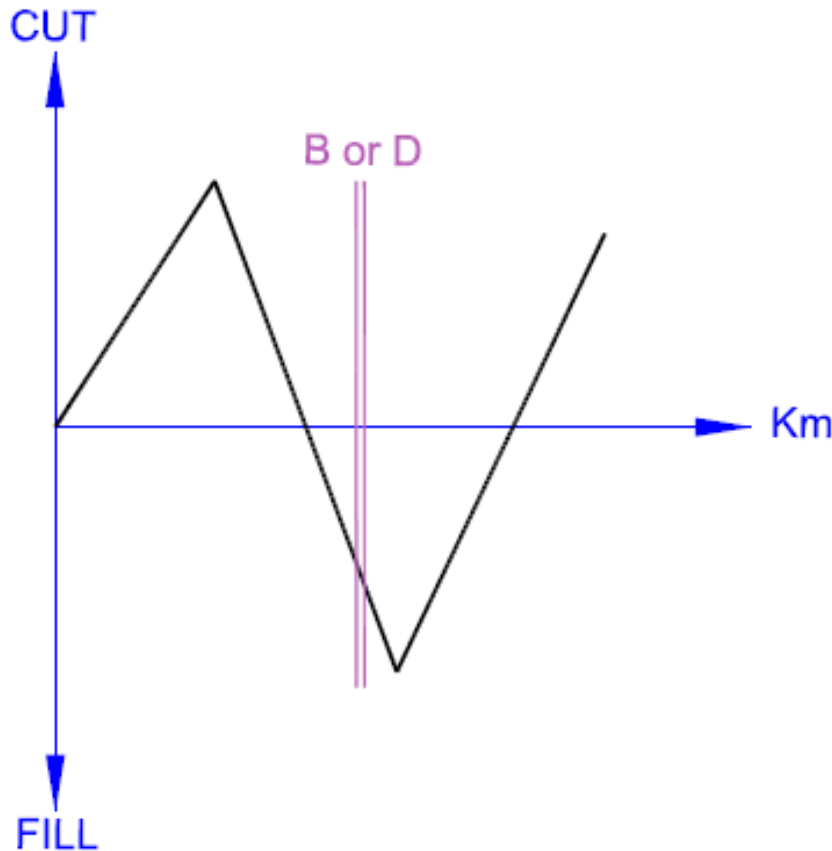




# حالت های مختلف موقعیت خط پخش

**حالت سوم:** معدن قرضه یا دپو در وسط مسیر قرار داشته باشد.

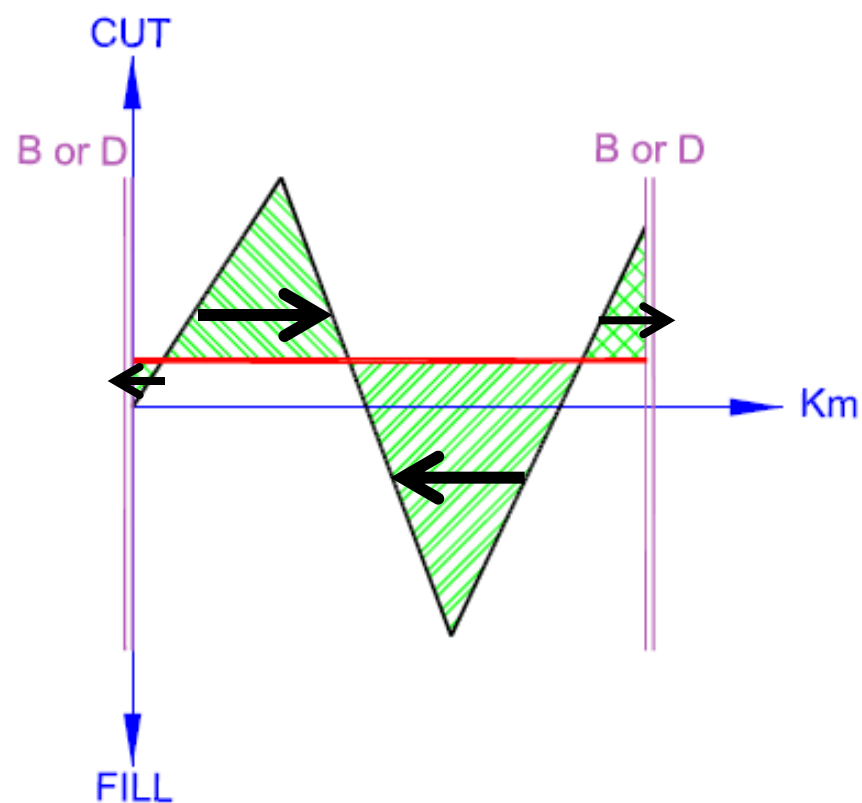
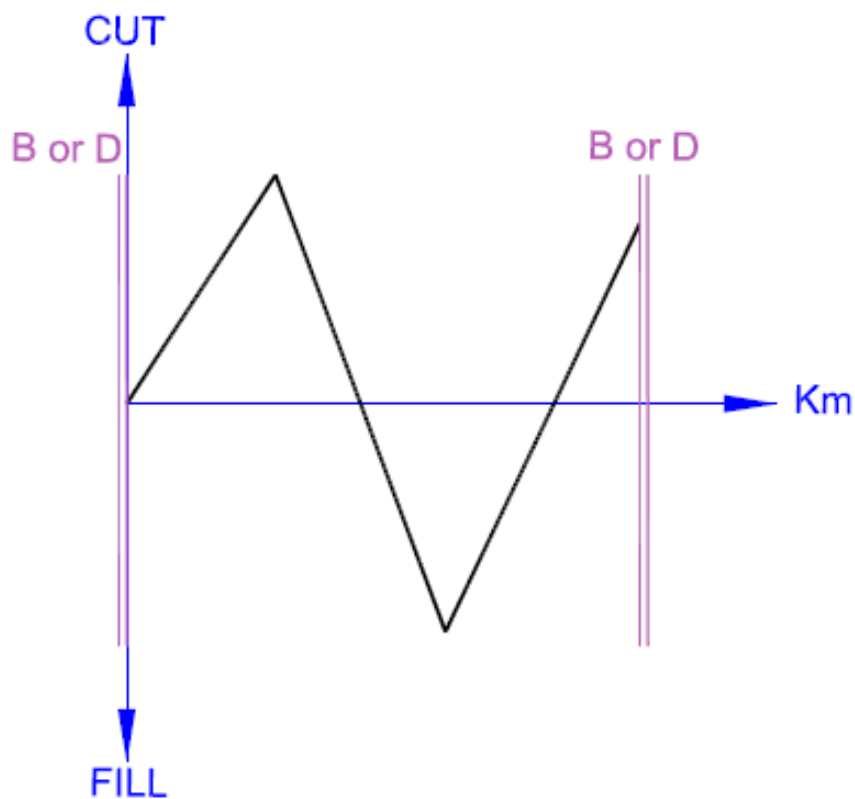
در این حالت خط پخش بهینه به صورت پله ای بوده و برای قطعه سمت چپ مانند حالت اول و برای قطعه سمت راست مانند حالت دوم عمل می شود.



# حالت های مختلف موقعیت خط پخش

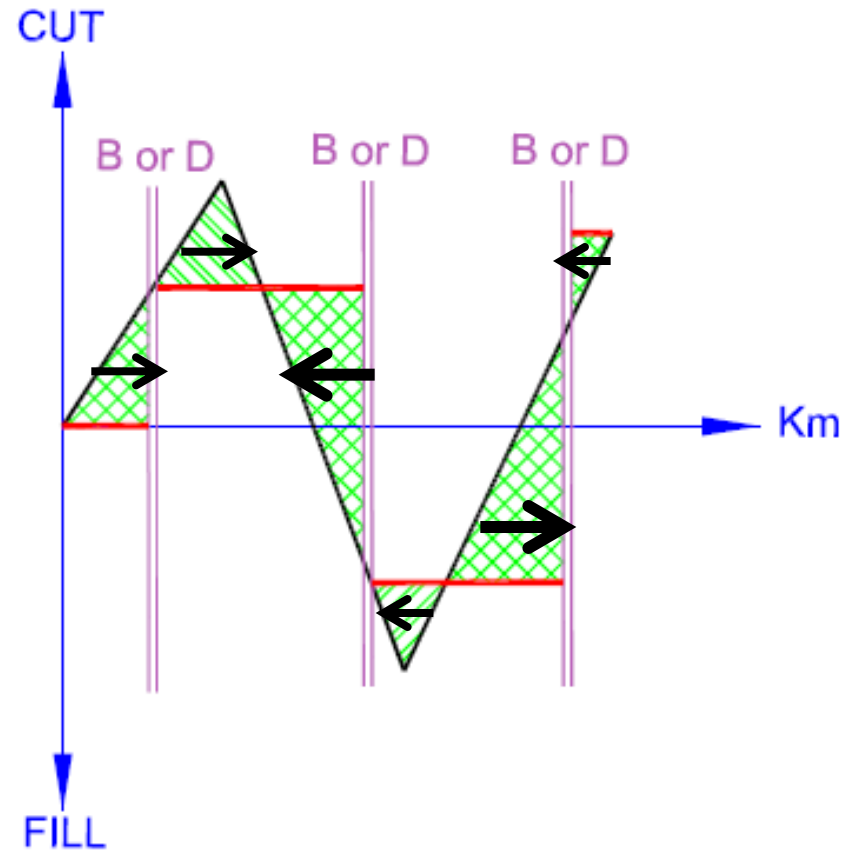
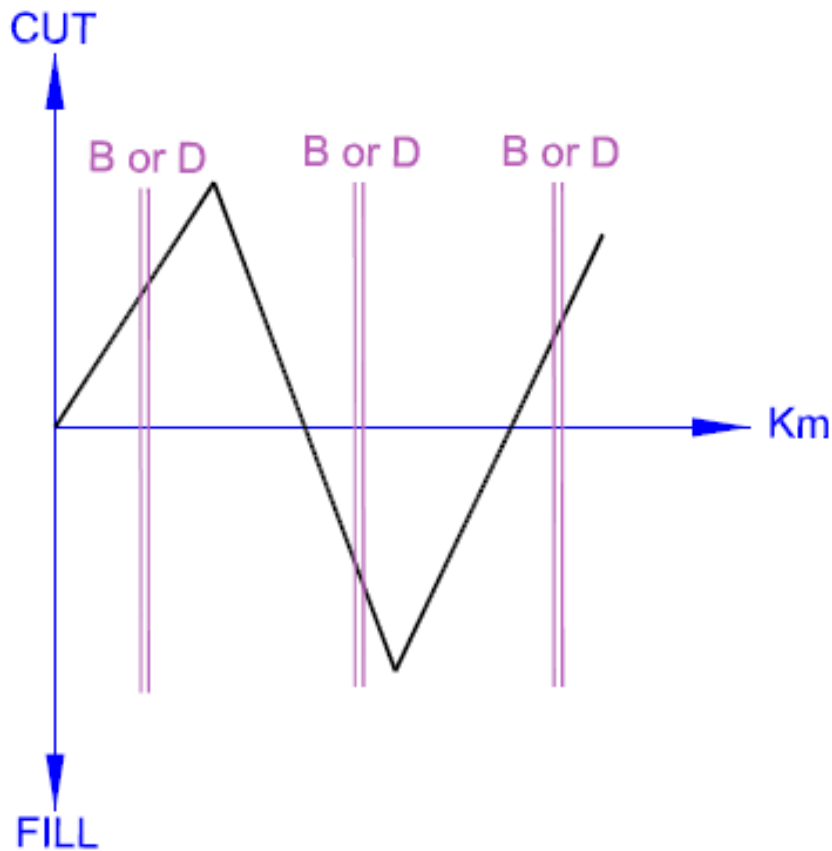
**حالت چهارم:** معدن قرضه یا دیو در طرفین مسیر قرار داشته باشد.

در این حالت بهترین خط پخش بین خط پایه و خط پایان بوده و محل دقیق آن بر اساس تساوی مجموع قاعده های سطوح بالا و پایین خط پخش تعیین می گردد.



# حالت های مختلف موقعیت خط پخش

**حالت پنجم:** معدن قرضه یا دیو به وفور در مسیر وجود داشته باشد.  
در این حالت خط پخش بهینه به صورت پله ای بوده و ترکیبی از سه حالت قبل است.

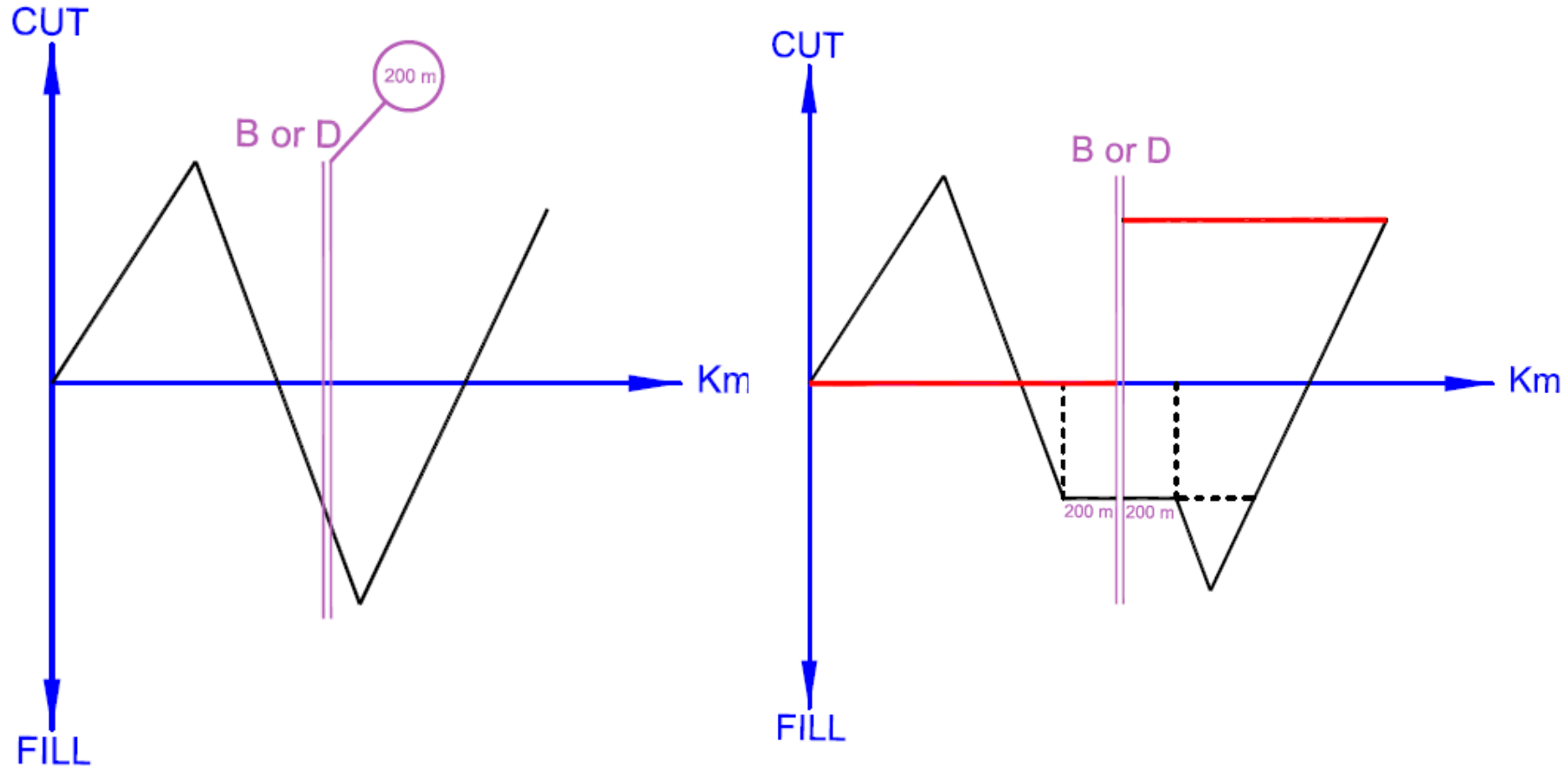


# اصلاح منحنی بروکنر بر اساس فاصله جانبی معدن قرضه یا دپو

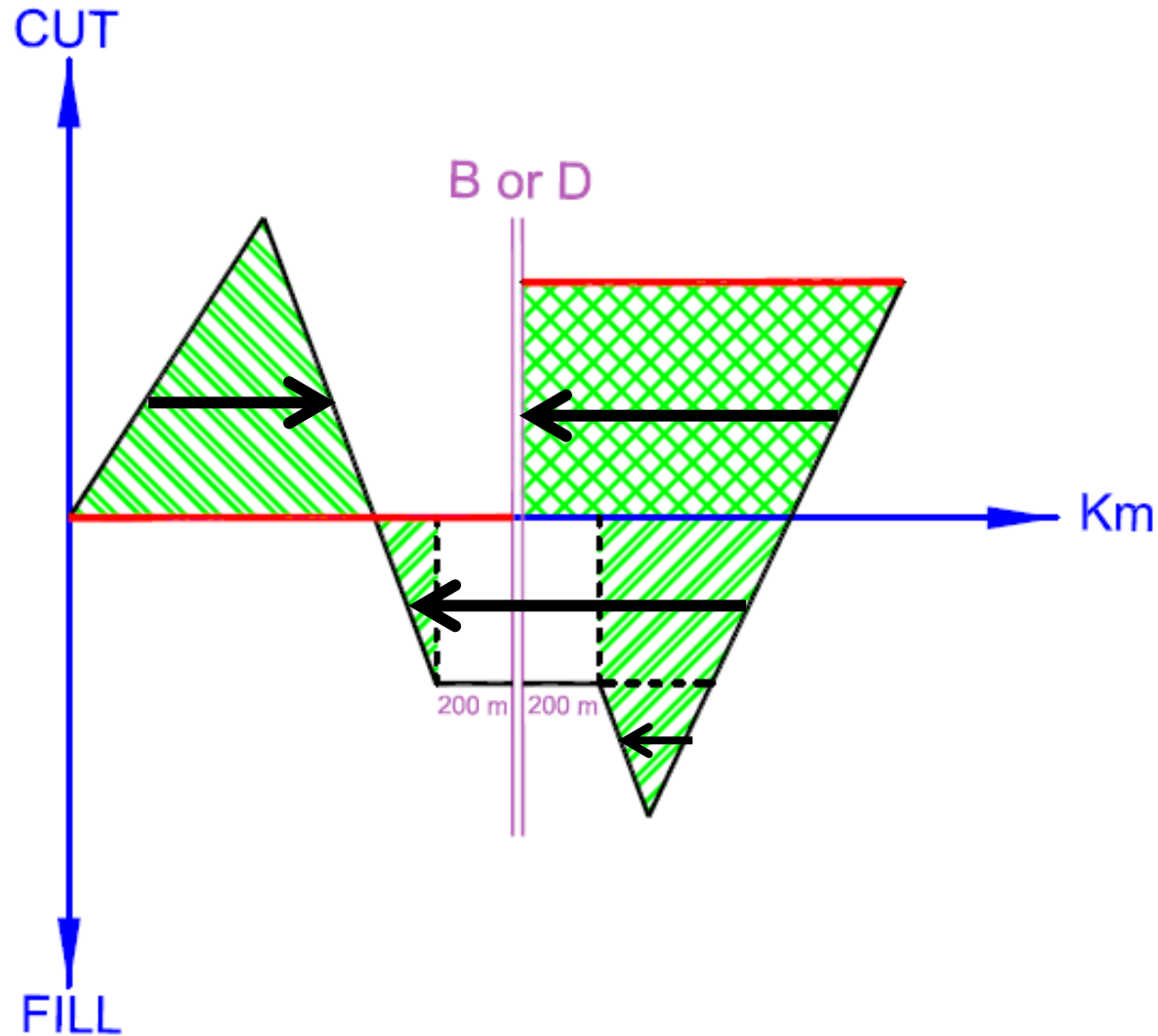
موقعیت واقعی معادن قرضه و دپو معمولاً در فاصله مشخصی از طرفین راه قرار دارد و دسترسی به آنها از طریق **احداث یک راه ارتباطی** انجام می شود. این راه ارتباطی فاصله رفتن به دپو و یا آمدن از قرضه را به فاصله حمل خاک **اضافه** می کند. بنابراین برای منظور کردن این فاصله در تعیین متوسط فاصله حمل خاک، باید **منحنی بروکنر را اصلاح** نمود.

برای اصلاح منحنی بروکنر می توان فاصله راه دسترسی به محل قرضه و دپو را به صورت **مجازی به کیلومتر اثر مسیر اضافه** کرد. برای این کار در طول این فواصل، منحنی بروکنر را به موازات خط پایه امتداد می دهند. خط پخش بهینه بر روی منحنی بروکنر اصلاح شده نیز شبیه حالت های گفته شده قابل ترسیم است.

# اصلاح منحنی بروکنر بر اساس فاصله جانبی معدن قرصه یا دیو



# اصلاح منحنی بروکنر بر اساس فاصله جانبی معدن قرضه یا دیو

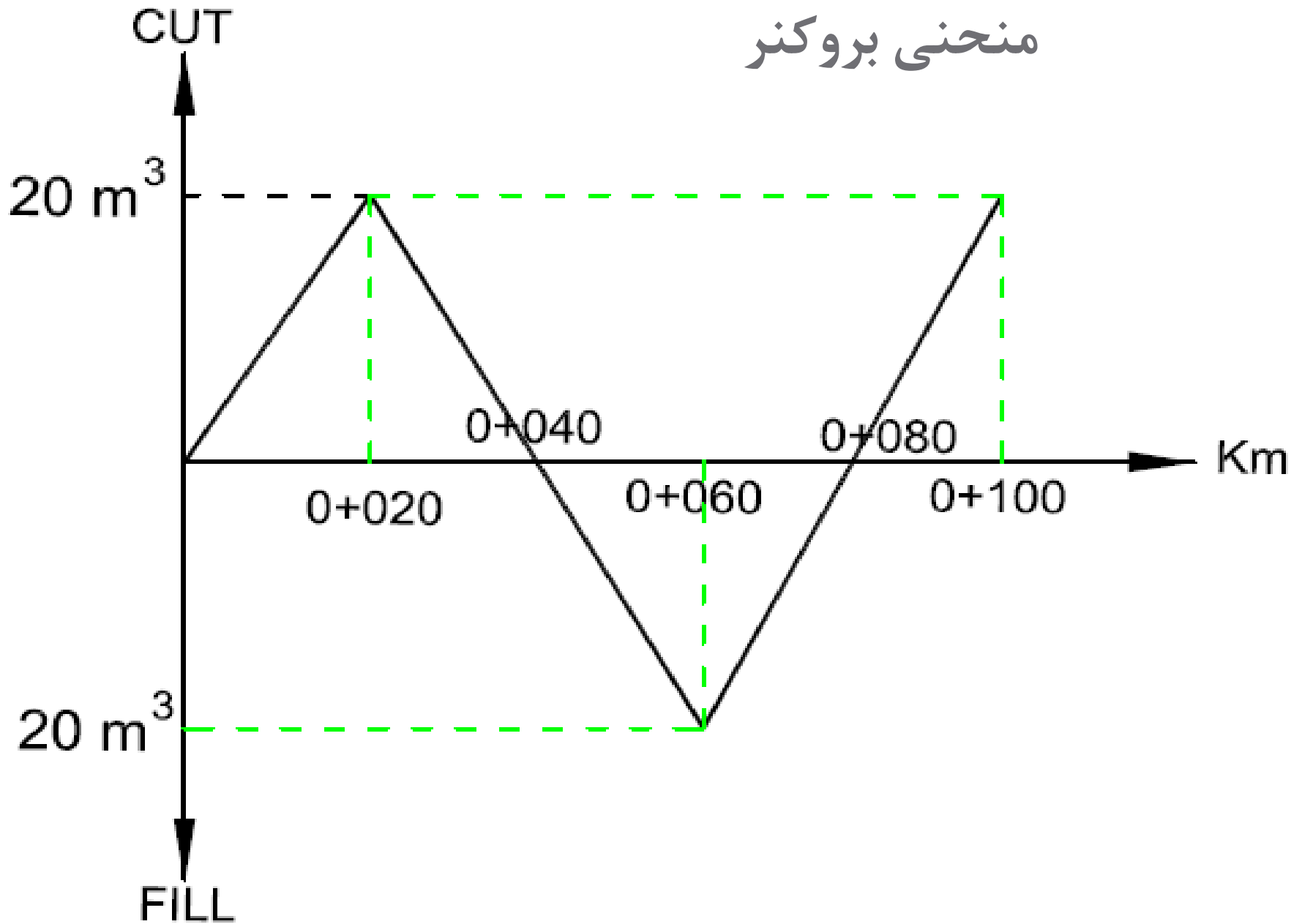




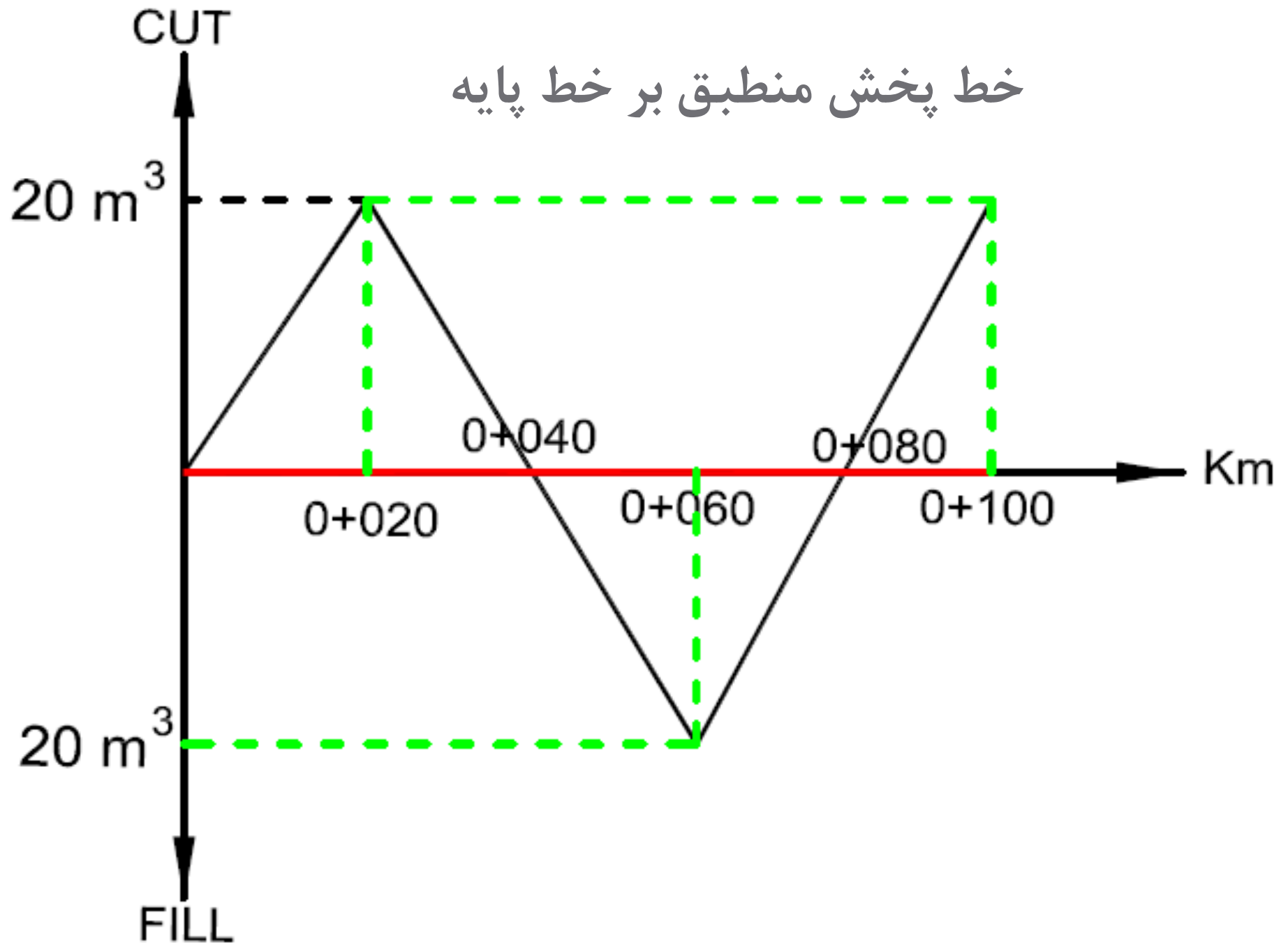
در ادامه مثالی برای تشخیص بهترین خط پخش و تاثیر آن  
در میزان عزم حمل، آورده شده است.



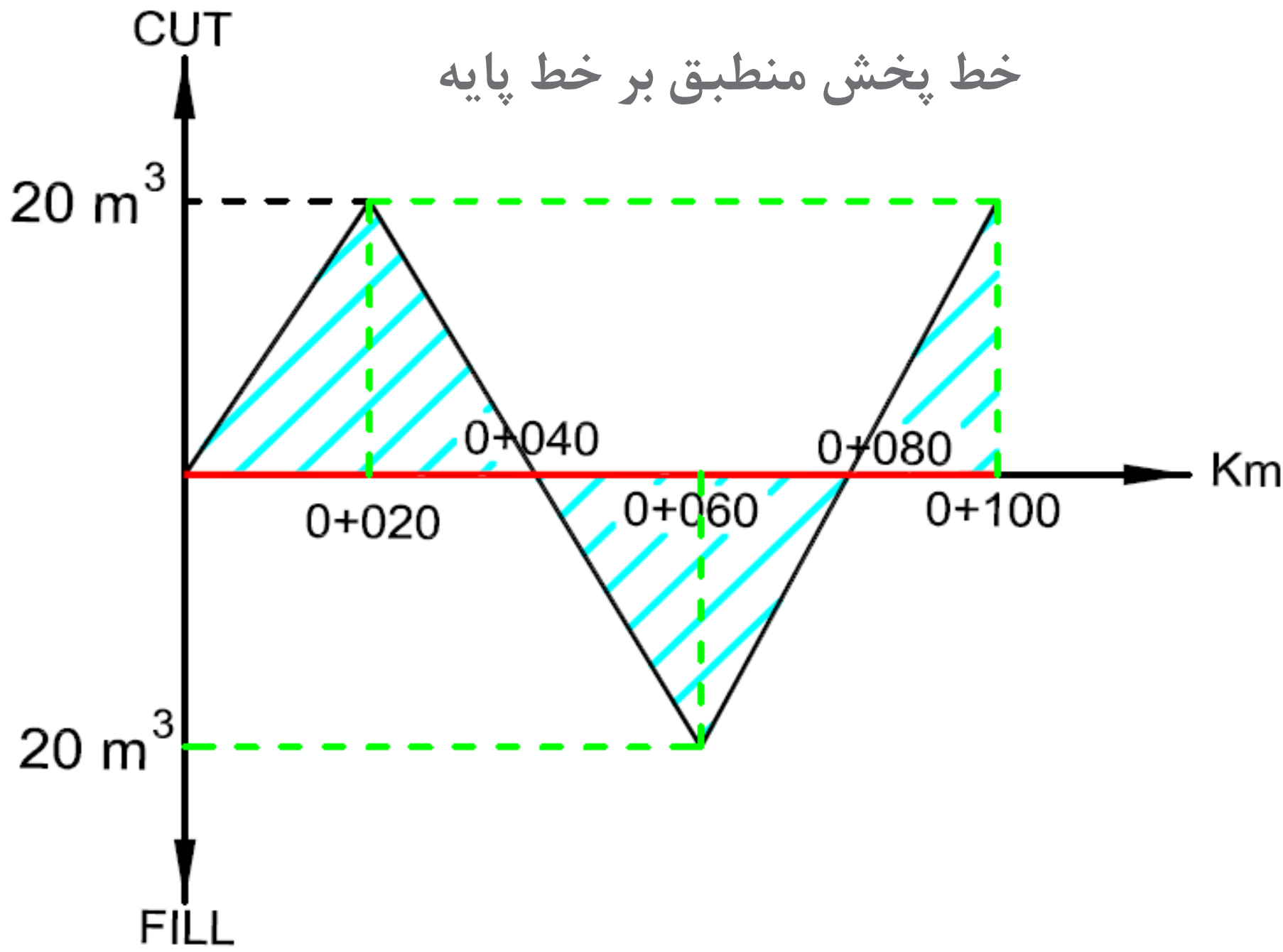
منحنی بروکنر



خط پخش منطبق بر خط پایه



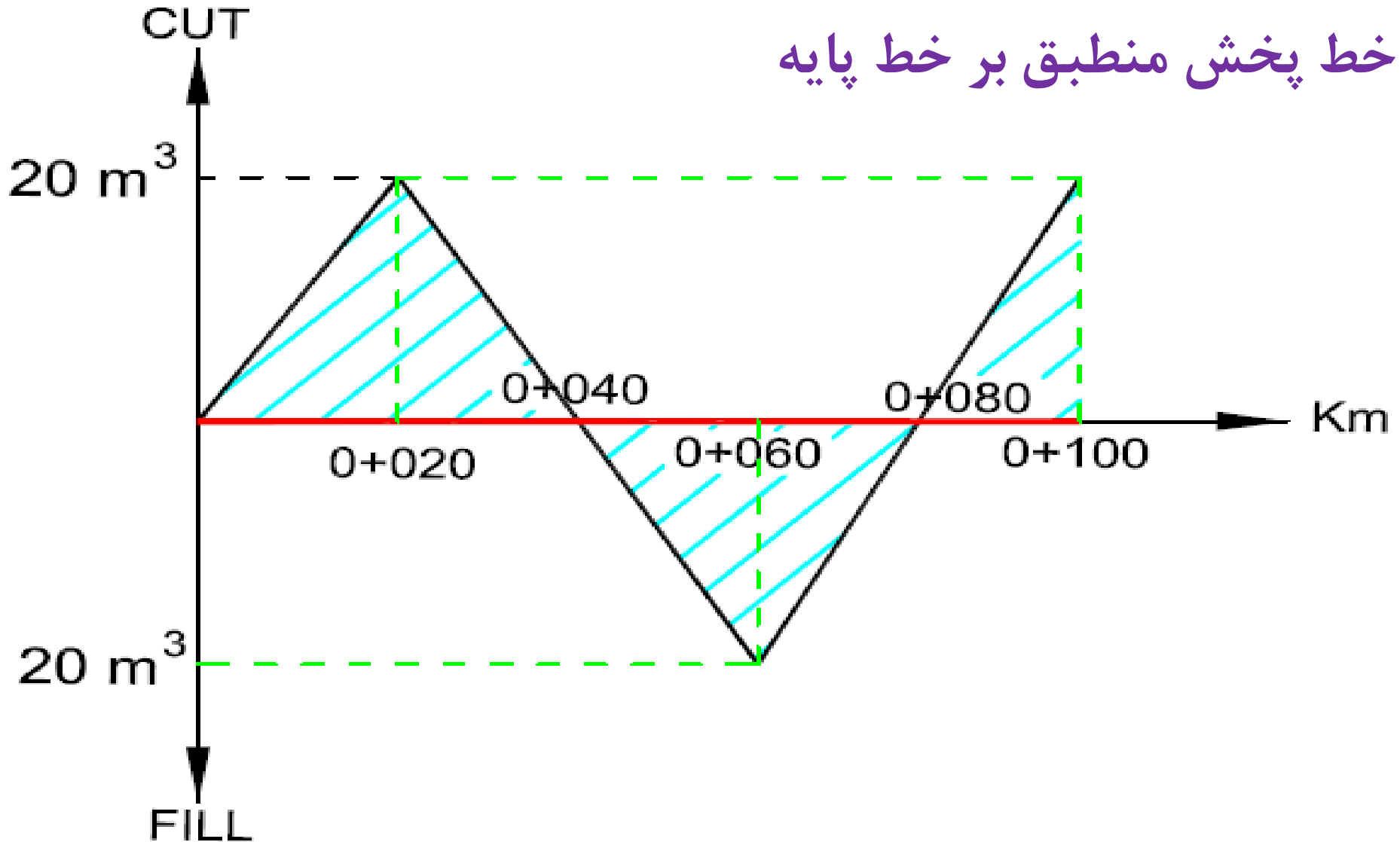
# خط پخش منطبق بر خط پایه



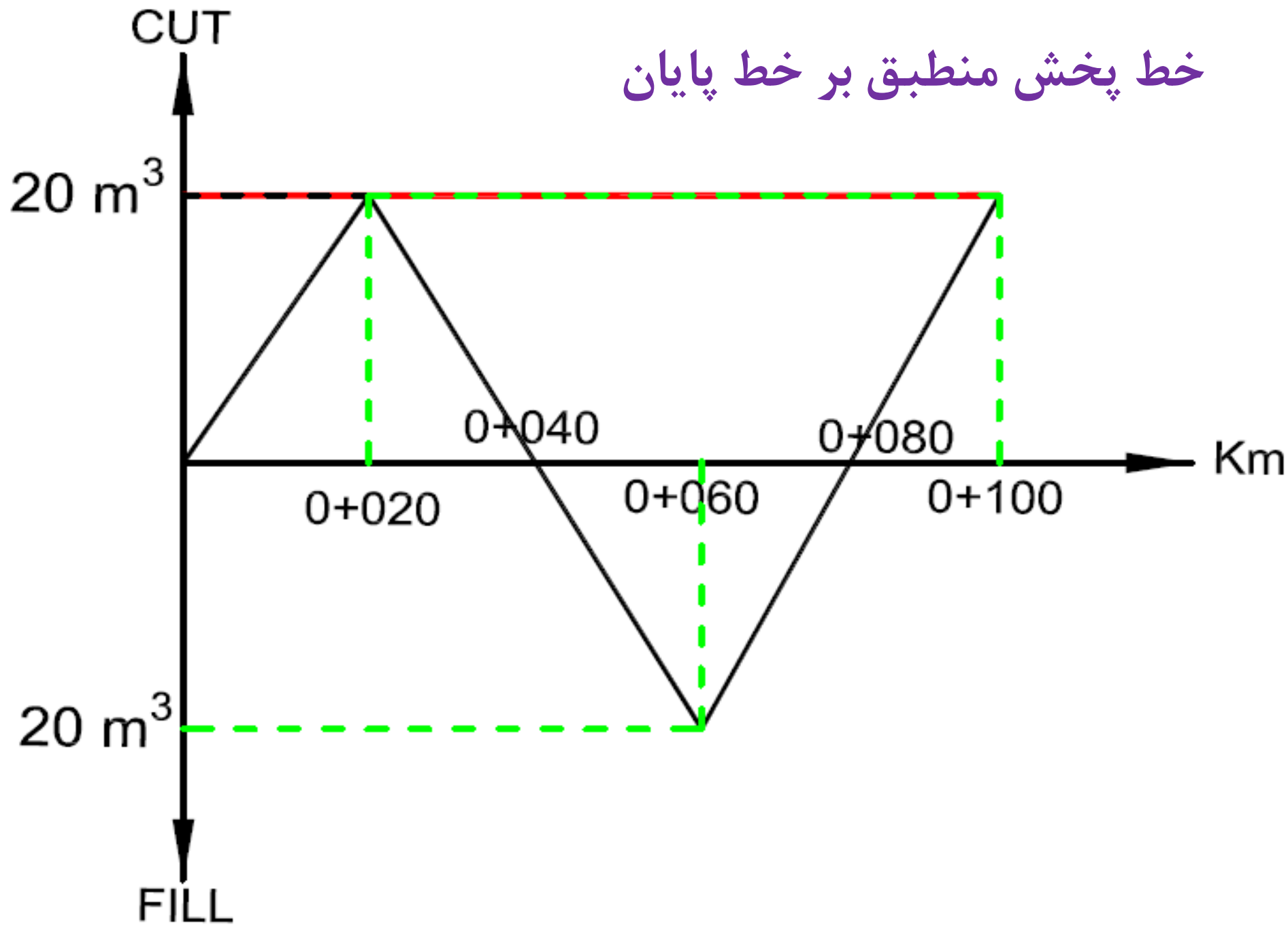
$$S = [(20 \times 40) \times 0.5] + [(20 \times 40) \times 0.5] + [(20 \times 20) \times 0.5]$$

$$S = 1000 \text{ m}^4 \quad \text{عزم حمل}$$

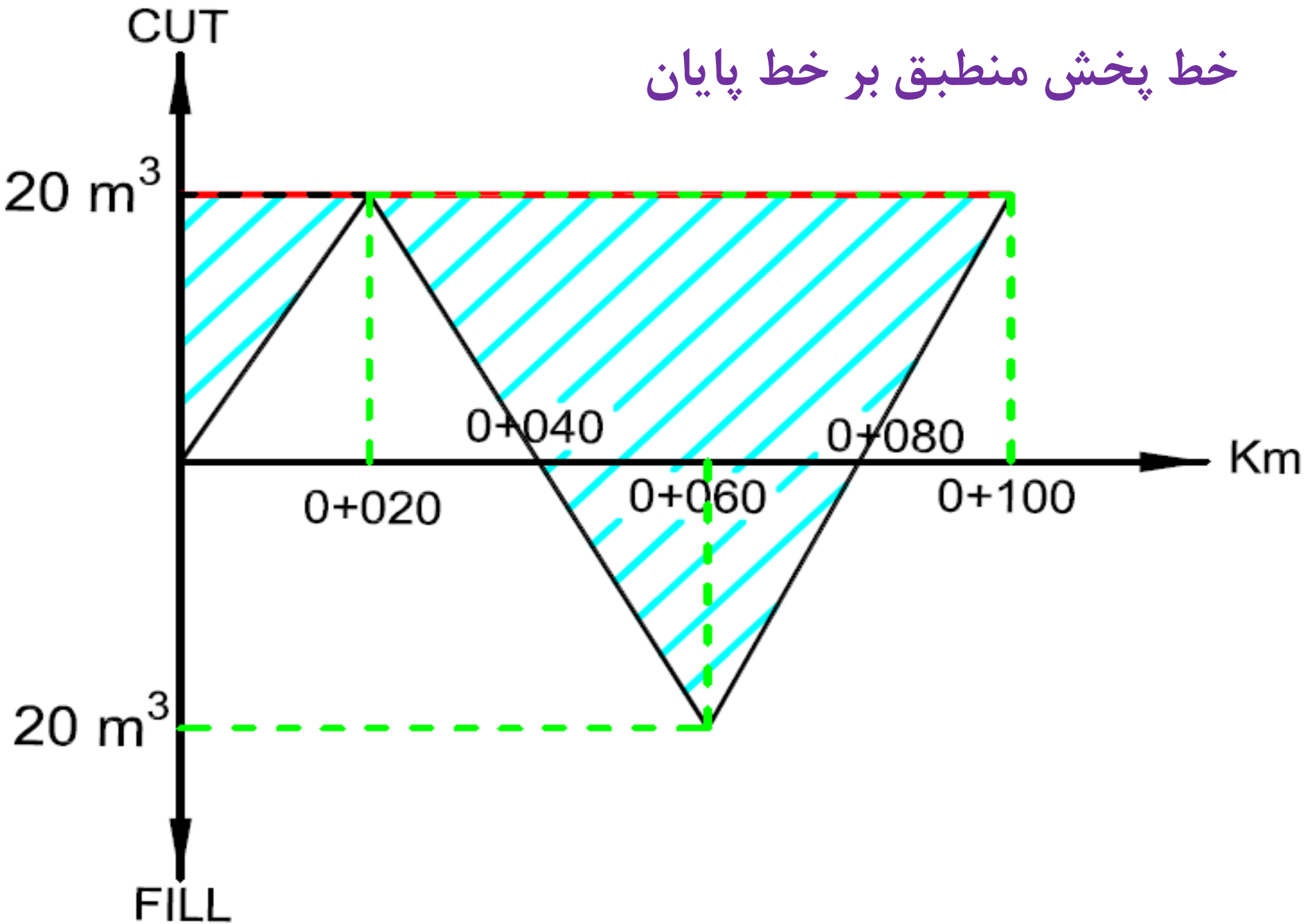
خط پخش منطبق بر خط پایه



خط پخش منطبق بر خط پایان



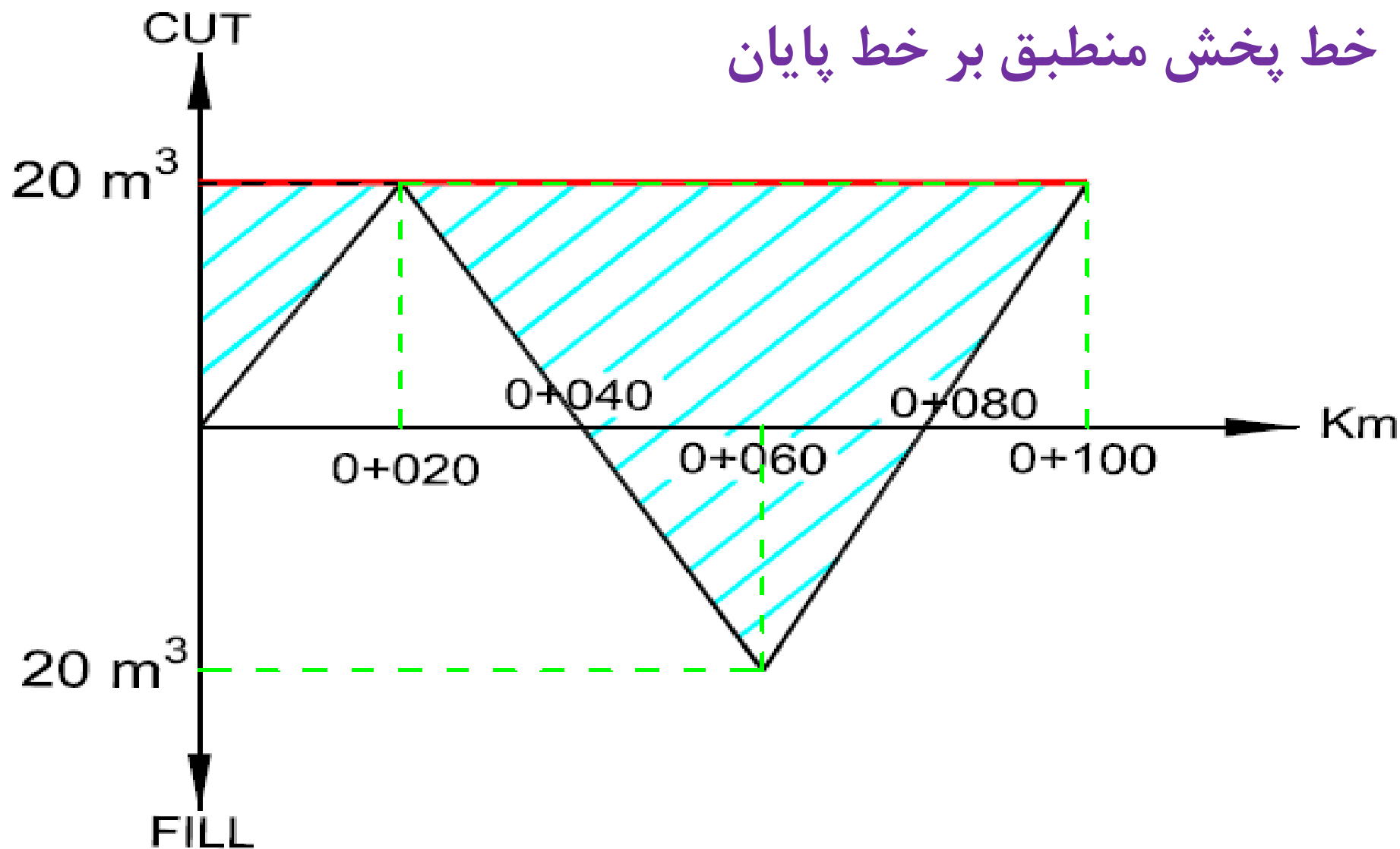
خط پخش منطبق بر خط پایان



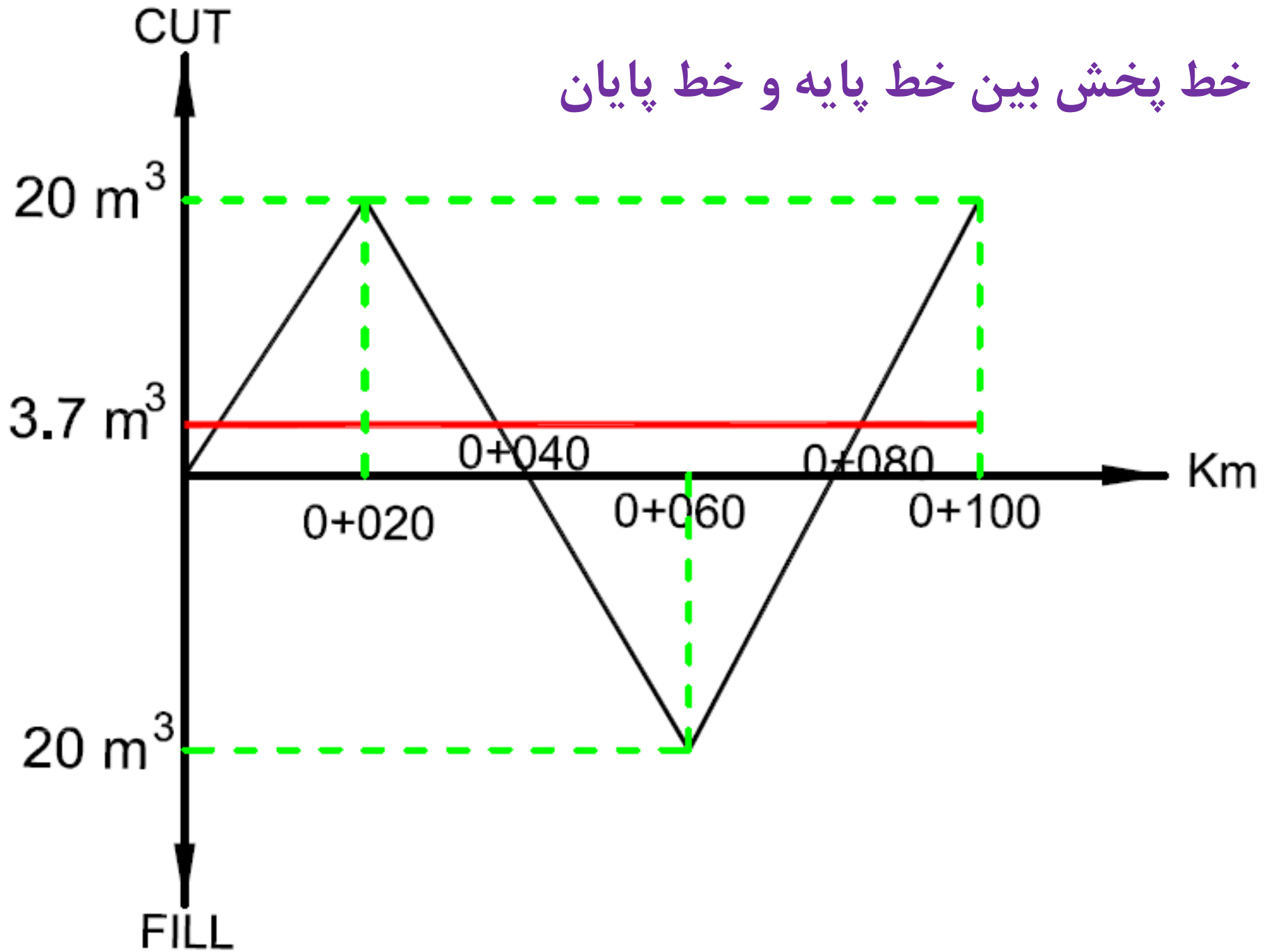
$$S = [(20 \times 20) \times 0.5] + [(40 \times 80) \times 0.5]$$

$$S = 1800 \text{ m}^4 \text{ عزم حمل}$$

خط پخش منطبق بر خط پایان

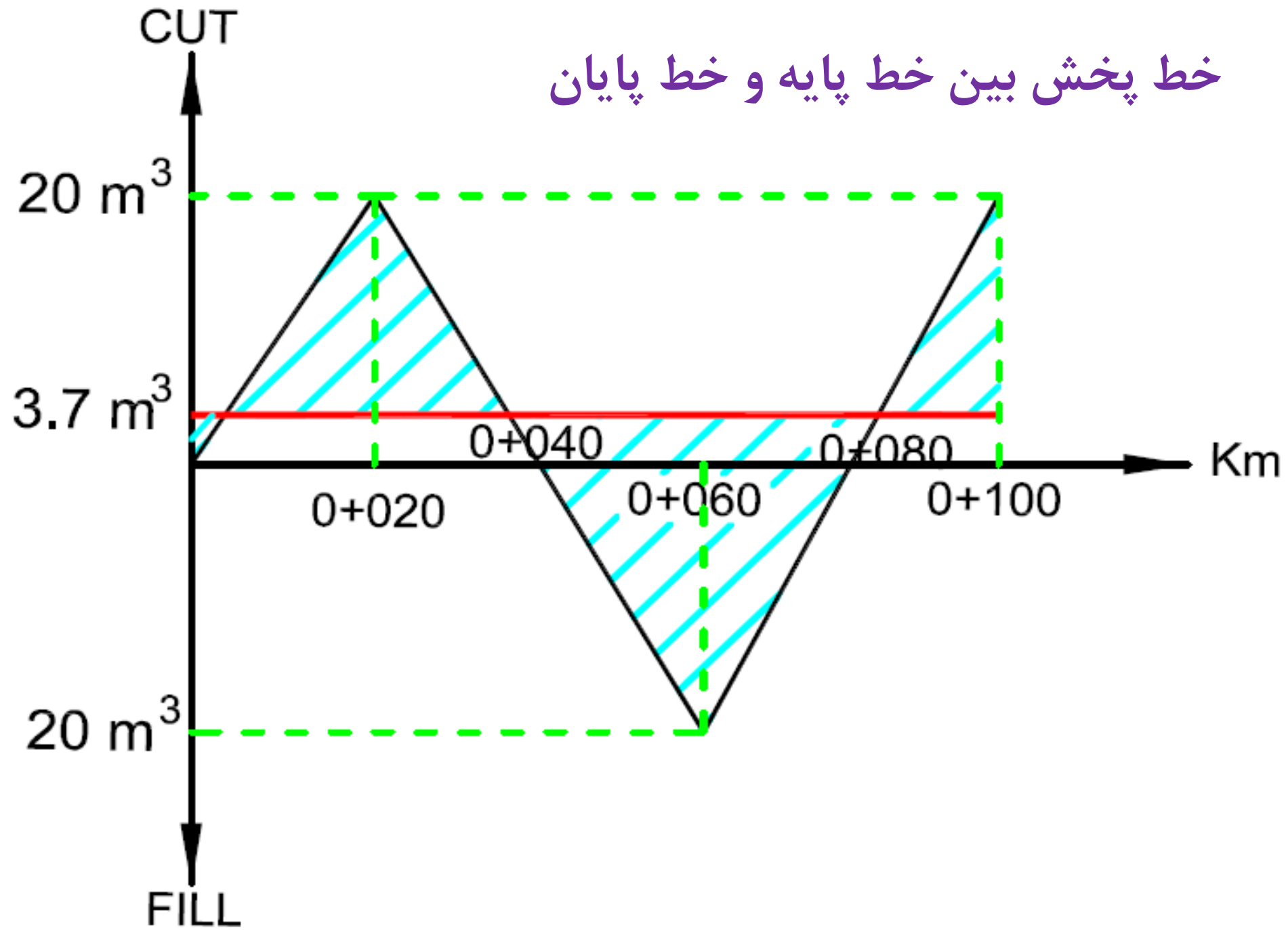


خط پخش بین خط پایه و خط پایان





خط پخش بین خط پایه و خط پایان



$$S = [(3.7 \cdot 3.7) \cdot 0.5] + [(16.3 \cdot 16.3) \cdot 0.5] + [(47.7 \cdot 23.7) \cdot 0.5] + [(16.3 \cdot 16.3) \cdot 0.5]$$

$$S = 837.78 \text{ m}^4 \quad \text{عزم حمل}$$

خط پخش بین خط پایه و خط پایان

