۵

عملیات خاکی

۵-۱- مقدمه

هدف از عملیات خاکی، خاکبرداری، سنگبری، تمیز کردن زمین طبیعی مسیر راه از درختان و ریشه‌ها، کندن و جابه‌جا کردن خاک نباتی به عمق ۱۰ تا ۳۰ سانتیمتر در محل‌های خاکریز، کوبیدن زمین طبیعی، تراکم خاکریز و حمل خاک از محل قرضه به خاکریزی و یا از خاکبرداری به خاکریزی می‌باشد. بطور کلی عملیات خاکی شامل موارد زیر است:

۱- خاکبرداری و سنگبری

۲- خاکریزی و متراکم کردن خاک

۳- حمل خاک

خاکبرداری در محل‌هایی از طول محور راه انجام می‌گردد که رقوم آنها بیشتر از رقوم خط پروژه است و خاکریزی در محل‌هایی صورت می‌گیرد که رقوم آنها کمتر از رقوم خط پروژه است. البته در محل‌هایی که نیاز به خاکبرداری می‌باشد، لازم است برای لایه‌های زیر اساس و اساس و همچنین شانه راه عملیات خاکریزی با مصالح انتخاب شده صورت پذیرد.

با توجه به اینکه عملیات خاکی بخش قابل‌توجهی از پروژه‌های راهسازی را به خود اختصاص می‌دهند، در این فصل در ارتباط با مقاطع عرضی، نحوه محاسبه حجم عملیات خاکی بین مقاطع عرضی و منحنی بروکنر که جهت اقتصادی کردن حمل خاک رسم می‌گردد، توضیح داده می‌شود. همچنین در انتهای فصل توضیحاتی در ارتباط با ماشین‌آلات مورد استفاده در عملیات خاکی ارائه می‌گردد.

۵-۲- خاکریزی و خاکبرداری

خاکبرداری آماده کردن خاک بستر راه در محل‌هایی از طول محور راه است که رقوم زمین طبیعی[۱] (GL) در آن نقاط بیشتر از رقوم خط پروژه[۲] (PL) مشخص شده در پروفیل طولی راه می‌باشد که این خاک اضافی توسط ماشین‌آلات راهسازی حفاری، حمل و تخلیه می‌گردد.

طبق دسته‌بندی آشتو خاکبرداری‌های انجام شده در یک پروژه راهسازی به ۴ دسته اصلی زیر تقسیم می‌شوند:

۱- خاکبرداری (حفاری) در سنگ[۳]: این نوع خاکبرداری شامل مواد و مصالحی می‌شوند که نمی‌توانند بدون استفاده از تجهیزات خاص، حفاری و خارج شوند ۲- خاکبرداری معمول[۴]: این نوع خاکبرداری شامل حفاری و جابه‌جایی تمام مواد و مصالحی می‌شود که در طول عملیات راهسازی انجام می‌شوند به نحوی‌که در دسته‌های دیگر قرار نمی‌گیرند.

۳- خاکبرداری مصالح نامناسب[۵]: این نوع خاکبرداری شامل حفاری و جابه‌جایی خاک‌های اشباع و یا غیر اشباع و مواد آلی می‌شود که قابل استفاده به عنوان مصالح خاکریز نیستند.

۴- خاکبرداری مصالح قرضه[۶]: این نوع خاکبرداری شامل حفاری و جابه‌جایی مواد خاکی مناسب و تایید شده می‌شود که برای ساخت خاکریزها مورد نیاز هستند.

منظور از خاکریزی آماده کردن خاک بستر راه شامل سابگرید، زیراساس، اساس و شانه راه در محل‌هایی از طول محور راه است که رقوم آنها کمتر از رقوم خط پروژه مشخص شده در پروفیل طولی مسیر می‌باشد که تا حد امکان سعی می‌گردد خاک حمل شده ناشی از خاکبرداری در محل‌های خاکریزی استفاده شود.

در ارتباط با خاکریزهای پروژه لازم است به موارد زیر توجه شود:

۱- Ground Level

۲- Project Level

۳- Rock excavation

۴- Common excavation

۵- Unsuitable excavation

۶- Borrow excavation

۱- ارتفاع خاکریزها: ارتفاع خاکریز به طور کلی با توجه به محل راه در منطقه مورد نظر تعیین می‌گردد. در واقع برای حفظ شیب در یک سری نقاط خاص نظیر پل‌ها و آبروها یا حفظ شیب مناسب برای منطقه مسطح یا تپه‌ماهور لازم است که خاکریز با یک ارتفاع مشخص احداث شود.

در مناطقی که سطح آب زیرزمینی نزدیک سطح زمین است، حداقل ارتفاع خاکریز معمولا بر این اساس تعیین می‌شود که از نفوذ آب زیرمینی به لایه‌های اساس، زیراساس و سابگرید جلوگیری شود. تحت چنین شرایطی لازم است که ارتفاع سطح سابگرید حداقل ۰/۶ متر بالاتر از سطح آب زیرزمینی باشد و این مقدار وقتی‌که خاک مستعد پدیده موئینگی به عنوان خاکریز استفاده می‌شود و یا منطقه در معرض خطر یخزدگی است، بیشتر در نظر گرفته می‌شود.

۲- شیب شیروانی خاکریزها: شیروانی‌های با شیب ملایم جهت استفاده در خاکریزها ترجیح داده می‌شوند تا عملیات تعمیر و نگه‌داری را تسهیل کنند و ایمنی مسیر را افزایش دهند. شیب مناسب پیشنهادی برای شیروانی خاکریزها و خاکبرداری‌ها با توجه به توپوگرافی منطقه‌ای که در آن مسیر راه احداث می‌گردد، در جدول ۵-۱ ارائه شده است. البته باید یادآوری نمود که نوع خاک نیز در میزان شیب مورد استفاده موثر است و در صورت لزوم شیروانی مورد نظر باید از نظر پایداری مورد بررسی قرار گیرد.

جدول ۵-۱- مقدار شیب شیروانی مناسب پیشنهادی برای خاکریزها و خاکبرداری‌های راه (قائم:افقی)

ارتفاع خاکریز یا خاکبرداری (m)	نوع زمین منطقه از نظر توپوگرافی (شیب زمین منطقه)		
	دشت (مسطح)	تپه‌ماهور (دارای شیب متوسط)	کوهستانی (دارای شیب تند)
۰-۱/۲	۶:۱	۶:۱	۴:۱
۱/۲-۳	۴:۱	۴:۱	۲:۱
۳-۴/۵	۴:۱	۲/۵:۱	۱/۷۵:۱
۴/۵-۶	۲:۱	۲:۱	۱/۷۵:۱
>۶	۲:۱	۲:۱	۱/۷۵:۱

۵-۳- تعاریف مربوط به عملیات خاکی

در ذیل تعاریفی که در حوزه عملیات خاکی در مسیر راه مورد استفاده قرار می‌گیرند، شرح داده می‌شوند.

محل قرضه[۱] (منبع قرضه): در صورتی‌که نتوان تمام خاک مورد نیاز در خاکریزها را از خاک بدست آمده از خاکبرداری‌ها در طول پروژه تامین نمود، باید خاک مورد نیاز را از محل دیگری که توسط دستگاه نظارت مناسب تشخیص داده می‌شود، تامین کرد. این محل را قرضه می‌نامند. در واقع قرضه دارای خاک مناسبی از نظر راهسازی می‌باشد و از این محل خاک به محل خاکریزی حمل شده و در آنجا مورد استفاده قرار می‌گیرد.

محل دپو[۲]: در صورتی‌که میزان خاک بدست آمده از خاکبرداری‌ها در طول پروژه بیشتر از خاک مورد نیاز در خاکریزها باشد، باید خاک اضافی در محلی مناسب در طول مسیر راه انبار شود. این محل را محل دپو می‌نامند که در واقع خاک اضافی ناشی از خاکبرداری به آن جا حمل می‌گردد.

۱- Borrow area
۲- Deposit area

قابلیت بارگیری: شاخصی است که تعیین می‌کند با چه درجه از سهولت می‌توان خاک را بارگیری نمود. خاک‌های غیرچسبنده و شن قابلیت بارگیری زیادی دارند و خاک‌های چسبنده و سنگ‌های به ابعاد بزرگ، دارای قابلیت بارگیری کمتری هستند.

به طور کلی خاک مورد استفاده در عملیات خاکی به یکی از سه حالت طبیعی (کنده نشده)، سست (کنده شده) و متراکم (کوبیده) یافت می‌شود که حجم خاک در هر یک از این حالت‌ها متفاوت است.

حجم خاک در حالت طبیعی: عبارت است از حجم خاک در حالت کنده نشده و بر حسب مترمکعب قرضه[۱] (BCM) بیان می‌شود.
حجم خاک در حالت سست: عبارت است از حجم خاک پس از کنده شدن و خاکبرداری که برحسب مترمکعب سست[۲] (LCM) بیان می‌شود. خاک پس از کنده شدن و خاکبرداری و یا در هنگام بارگیری سست‌تر از زمانی است که در حالت طبیعی در قرضه وجود دارد و به عبارت بهتر حجم آن اضافه می‌گردد.

حجم خاک متراکم: عبارت است از حجم خاک پس از کوبیدن و متراکم کردن آن که برحسب مترمکعب متراکم[۳] (CCM) بیان می‌شود. پس از متراکم شدن حجم خاک کم می‌گردد.

تورم خاک[۴] : پس از کنده شدن خاک به طور معمول حجم آن افزایش می‌یابد، به طوری‌که خاک موجود در یک مترمکعب قرضه، پس از خاکبرداری بیش از یک مترمکعب اشغال خواهد نمود. این افزایش حجم را تورم خاک می‌نامند. رابطه ذیل برای تعیین ضریب تورم یا ضریب افزایش حجم خاک استفاده می‌شود:

$$\text{Swelling}(\%) = (\frac{\text{LCM}}{\text{BCM}} - ۱) \times ۱۰۰ \qquad (۱-۵)$$

انقباض خاک: حجم خاک در اثر تراکم کاهش می‌یابد، به طوری‌که یک وزن معین خاک پس از تراکم حجم کمتری را نسبت به زمان حالت طبیعی خاک اشغال خواهد نمود. این کاهش حجم انقباض نامیده می‌شود.

$$\text{Contraction}(\%) = (۱ - \frac{\text{CCM}}{\text{BCM}}) \times ۱۰۰ \qquad (۲-۵)$$

ضریب بار[۵]: برای تسهیل تبدیل مترمکعب سست به مترمکعب قرضه از ضریب بار استفاده می‌شود که از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$\text{Load Factor}(\%) = (\frac{\text{LCM}}{\text{BCM}}) \times ۱۰۰ \qquad (۳-۵)$$

۵-۴-۱- محل مقاطع (نیمرخ‌های عرضی)

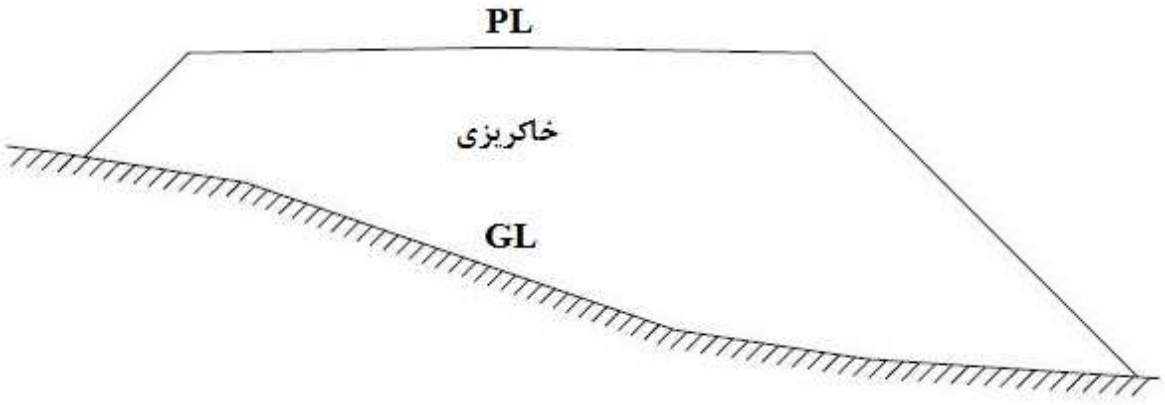
به طور کلی در ارتباط با انتخاب محل مقاطع عرضی به موارد زیر توجه می‌شود:
- مقاطع عرضی معمولا در هر ایستگاه کامل و یا در وسط هر ایستگاه روی محور راه انتخاب می‌شوند.

۱- Bank Cubic Meter
۲- Loose Cubic Meter
۳- Compacted Cubic Meter
۴- Swell
۵- Load factor

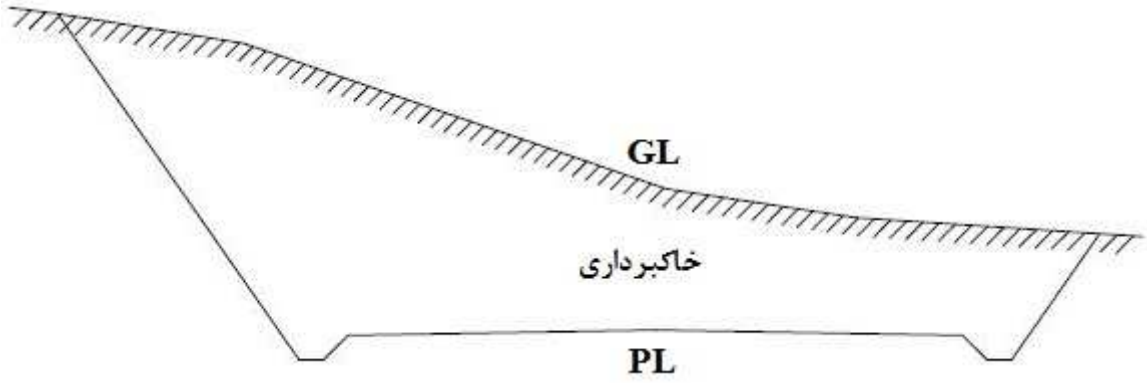
- مقاطع عرضی در قوس‌ها ممکن است با فاصله نزدیک‌تری نسبت به هم در نظر گرفته شوند.
- در محل‌هایی که وضعیت عوارض زمین تغییر ناگهانی می‌کند، نیاز است که مقاطع عرضی در نظر گرفته شوند.
- در مواردی نظیر خاکبرداری در قسمت‌های سنگی که هزینه عملیات خاکی زیاد است، باید مقاطع عرضی با فاصله نزدیک‌تری نسبت به هم انتخاب شوند.
- در محل‌هایی که زمین طبیعی محور راه را قطع کند، نیاز است که مقطع عرضی برای مسیر راه در نظر گرفته شود.

۵-۴-۲- تیپ‌های مختلف مقاطع عرضی

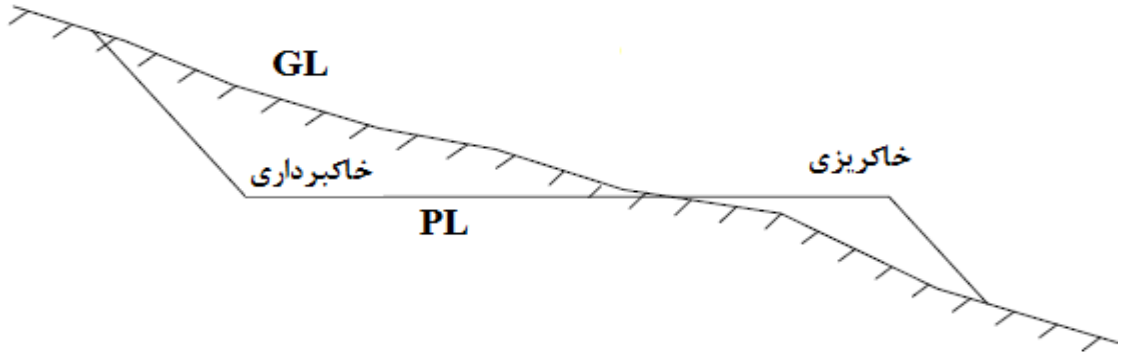
یک مقطع عرضی ممکن است نشان‌دهنده خاکبرداری، خاکریزی و یا ترکیبی از خاکبرداری و خاکریزی (مقطع مختلط) باشد که شکل ۵-۲ این حالت‌ها را نشان می‌دهد. به طور معمول در هر مقطع عرضی یک قرائت میر (شاخص) بر روی میخ محور راه، و دو قرائت اضافی در محل تقاطع شیروانی‌های طرفین و سطح زمین طبیعی جهت تعیین رقوم این نقاط انجام می‌گیرد. در مواقعی که وضعیت سطح زمین طبیعی به علت ناهمواری ایجاب کند، ممکن است قرائت‌های بیشتری لازم باشد.



۵-۲-۱- مقطع عرضی در خاکریزی



۵-۲-۲- مقطع عرضی در خاکبرداری



۵-۲-۳- مقطع عرضی مختلط (ترکیبی از خاکبرداری و خاکریزی)

شکل ۵-۲- تیپ‌های مختلف مقاطع عرضی

۵-۵- محاسبه حجم عملیات خاکی

به طور معمول روش میانگین سطوح جهت محاسبه حجم خاکریزی و یا خاکبرداری استفاده می‌شود. در روش میانگین سطوح فرض بر این است که عوارض طبیعی بین دو ایستگاه متوالی تغییر چندانی نداشته باشد. حالات مختلفی که می‌تواند در این روش روی دهد، در ذیل توضیح داده شده و بررسی می‌شوند.

حالت ۱- هر دو مقطع در خاکریزی

دو مقطع عرضی مجاور یکدیگر در خاکریزی هستند.

$$V_f = \frac{A_۱ + A_۲}{۲} L \qquad (۴-۵)$$

V_f = حجم خاکریزی

$A_۱$ = مساحت سطح مقطع نیمرخ ۱

$A_۲$ = مساحت سطح مقطع نیمرخ ۲

L = فاصله بین دو نیمرخ ۱ و ۲

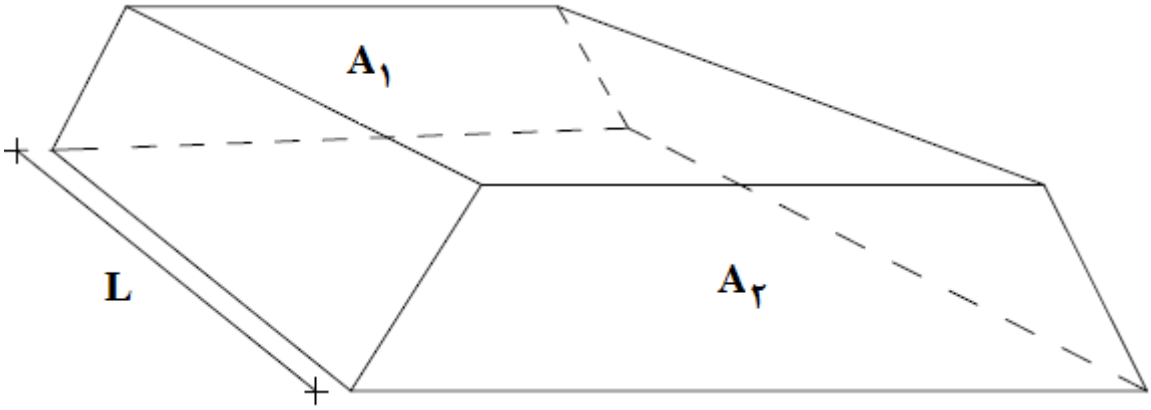
حالت ۲- هر دو مقطع در خاکبرداری

دو مقطع عرضی مجاور یکدیگر در خاکبرداری هستند.

$$V_C = \frac{A_۱ + A_۲}{۲} L \qquad (۵-۵)$$

V_c = حجم خاکبرداری

شکل ۵-۳ به صورت شماتیک دو حالت فوق را که هر دو مقطع کنار هم در خاکریزی و یا خاکبرداری هستند، نشان می‌دهد.



شکل ۵-۳- نحوه محاسبه حجم عملیات خاکی بین دو مقطع مشخص با فاصله L

لازم به ذکر است که جسم راه بین دو نیمرخ، لزوما منشور قائم نمی‌باشد و لذا مقدار دقیق حجم عملیات خاکی بین دو نیمرخ مجاور برابر است با:

$$V = \frac{A_۱ + ۴A_m + A_۲}{۶} L \qquad (۶-۵)$$

A_m = مساحت مقطع عرضی واقع بین دو نیمرخ ۱ و ۲

حالت ۳- یک مقطع در خاکریزی و دیگری در خاکبرداری

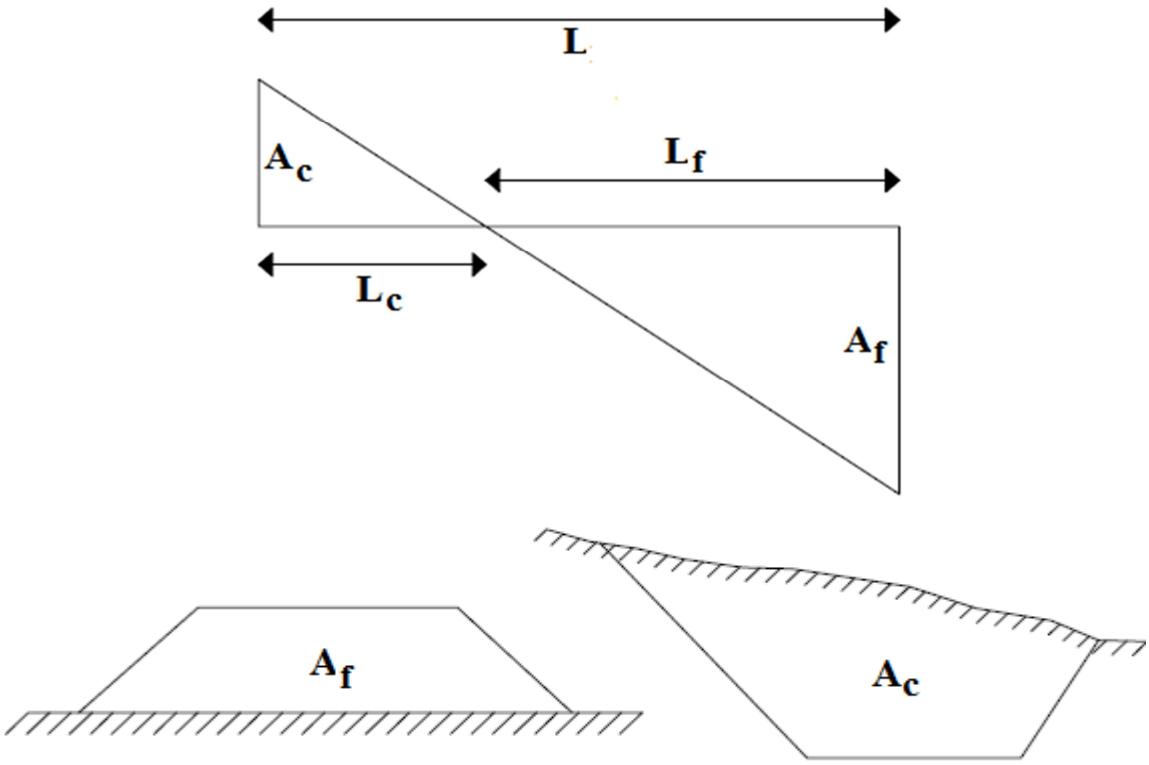
در این حالت لازم است که برای محاسبه حجم خاکریزی و خاکبرداری نقطه صفر تعیین گردد (مطابق با شکل ۵-۴). نقطه صفر محلی فرضی بین دو نیمرخ مشخص است که در آن خاکریزی به خاکبرداری تبدیل می‌شود. در این حالت نحوه محاسبه احجام عملیات خاکریزی و خاکبرداری به صورت زیر است:

$$V_f = \frac{A_f + ۰}{۲} L_f$$

$$V_C = \frac{۰ + A_c}{۲} L_c \qquad (۷-۵)$$

$$L_f = \left(\frac{A_f}{A_f + A_c}\right) L$$

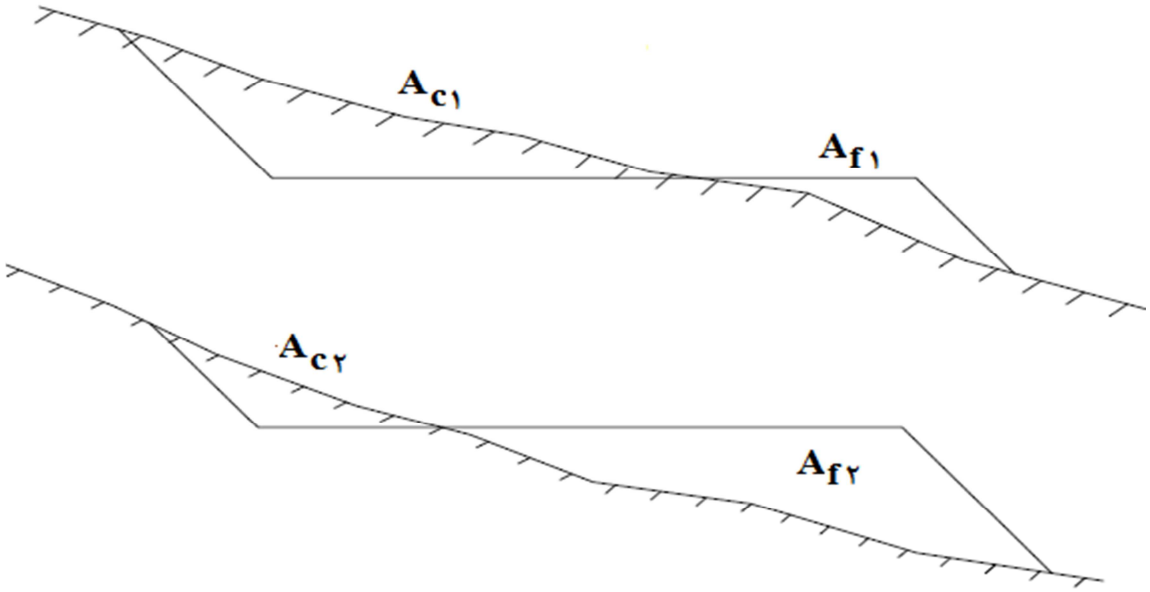
$$L_c = \left(\frac{A_c}{A_f + A_c}\right) L$$



شکل ۵-۴- نحوه محاسبه حجم عملیات خاکی بین دو مقطع مشخص یکی در خاکریزی و دیگری در خاکبرداری

حالت ۴- دو مقطع مجاور مختلط

۴-۱- در صورتی‌که دو مقطع مجاور یکدیگر مختلط باشند یعنی هر دو مقطع دارای خاکبرداری و خاکریزی باشند، اگر خاکریزی‌ها و خاکبرداری‌ها در مقابل یکدیگر قرار گرفته باشند (نظیر شکل ۵-۵)، احتیاجی به پیدا کردن نقطه صفر وجود ندارد. در این حالت برای خاکریزی‌های مقابل هم نظیر حالت ۱ و برای خاکبرداری‌های مقابل یکدیگر نظیر حالت ۲ عمل می‌شود.



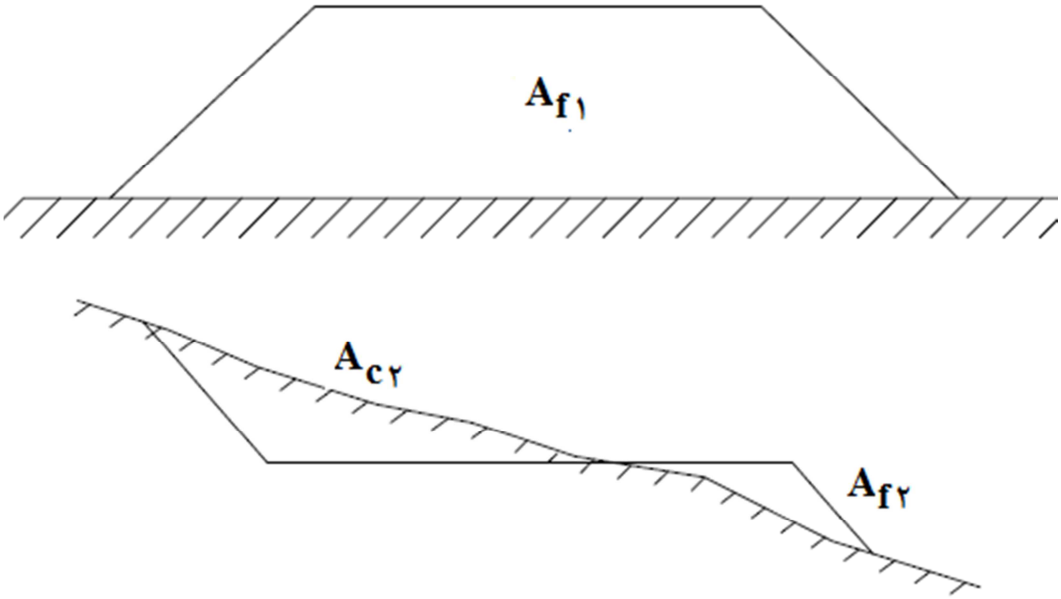
شکل ۵-۵- محاسبه حجم عملیات خاکی برای مقاطع مختلط در حالت قرار گرفتن خاکریزی‌ها و خاکبرداری‌ها در مقابل هم

$$V_f = \frac{A_{f1} + A_{f2}}{2} L$$
$$V_C = \frac{A_{c1} + A_{c2}}{2} L$$
(۸-۵)

۴-۲- در صورتی‌که در دو مقطع مختلط مجاور خاکریزی در مقابل خاکبرداری و بالعکس باشد، برای هر قسمت باید نقطه صفر را پیدا کرد و حجم خاکریزی و خاکبرداری را بدست آورد.

۴-۳- در صورتی‌که مقطع مختلط در مقابل مقطع یکدست واقع شده باشد (نظیر شکل ۵-۶)، برای قسمتی که لازم است باید مقطع صفر را بدست آورد. محاسبه احجام خاکی در این حالت به صورت زیر است:

$$V_f = \frac{A_{f1} + A_{f2}}{2} L$$
$$V_C = \frac{A_{c2}}{2} \times \frac{A_{c2}}{A_{c2} + A_{f1}} L$$
(۹-۵)



شکل ۵-۶- نحوه محاسبه حجم عملیات خاکی در حالت قرار گرفتن مقطع مختلط در مجاورت مقطع یکدست

۵-۶- محاسبه مساحت مقاطع عرضی مسیر راه

جهت محاسبه احجام عملیات خاکی با روش فوق، لازم است که مساحت مقاطع عرضی مجاور یکدیگر محاسبه شوند. جهت محاسبه مساحت مقاطع عرضی مسیر راه از روش‌های ذیل استفاده می‌شود:

۱- روش هندسی
۲- روش مختصات
۳- روش ترسیمی (استفاده از پلانیمتر)
۴- روش تبدیل به سطوح کوچکتر
۵- روش پرگار

۶- روش شمارش خانه‌های شطرنجی
۷- استفاده از کامپیوتر

این روش‌ها هر کدام در ذیل به صورت جداگانه توضیح داده می‌شوند:

۵-۶-۱- روش هندسی

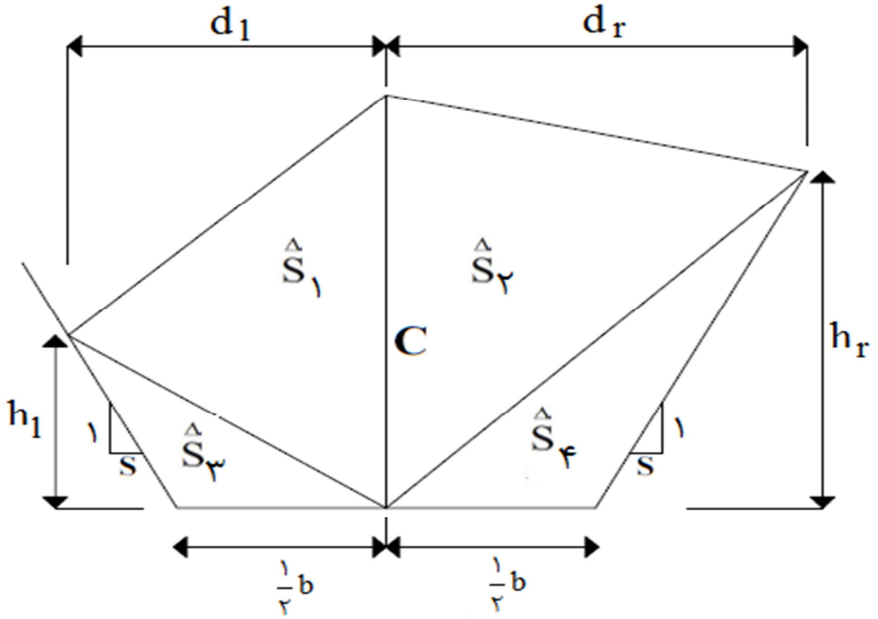
در این روش سطح مقطع به سطوح هندسی قابل محاسبه یعنی مثلث و ذوزنقه تقسیم می‌شود و این سطوح با یکدیگر جمع می‌گردند. در واقع در این روش با استفاده از روابط هندسی حجم عملیات خاکی بر حسب عرض جاده، شیب شیروانی‌ها، ارتفاع خاکریزی یا خاکبرداری و فاصله عمودی بین زمین طبیعی و سطح راه در محل تقاطع شیروانی و زمین طبیعی بدست می‌آید. به عنوان نمونه شکل ۵-۷ به صورت شماتیک پارامترهای مورد استفاده جهت انجام محاسبات برای یک مقطع عرضی سه رقومی (سه قرائتی) واقع در خاکبرداری را نشان می‌دهد. پارامترهای مورد استفاده و نحوه انجام محاسبات در ادامه شرح داده می‌شوند:

b = عرض جاده
s = شیب شیروانی‌ها (۱(قائم):S (افقی))
F = ارتفاع خاکریزی
C = ارتفاع خاکبرداری
h_r = فاصله عمودی بین زمین طبیعی و سطح راه در محل تقاطع شیروانی و زمین طبیعی در سمت راست محور راه
h_l = فاصله عمودی بین زمین طبیعی و سطح راه در محل تقاطع شیروانی و زمین طبیعی در سمت چپ محور راه

$$d_l = \frac{۱}{۲}b + Sh_l$$

$$d_r = \frac{۱}{۲}b + Sh_r \qquad (۱۰-۵)$$

$$A_۳ = \hat{S}_۱ + \hat{S}_۲ + \hat{S}_۳ + \hat{S}_۴ = \frac{۱}{۲}Cd_l + \frac{۱}{۲}Cd_r + \frac{۱}{۲}\times\frac{b}{۲}h_l + \frac{۱}{۲}\times\frac{b}{۲}h_r = \frac{۱}{۲}C(d_l + d_r) + \frac{۱}{۴}b(h_l + h_r)$$



شکل ۵-۷- محاسبه مساحت مقطع عرضی به روش هندسی (مقطع عرضی سه رقومی که در خاکبرداری می‌باشد)

۵-۶-۲- روش مختصات

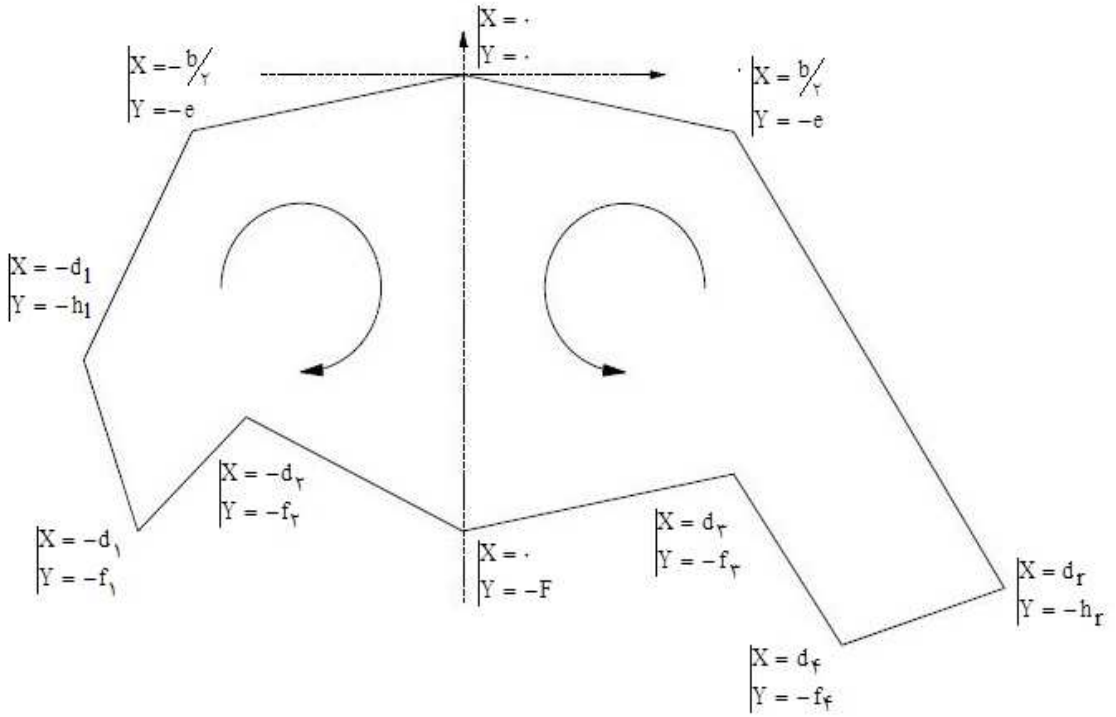
روش مختصات جهت محاسبه مساحت مقاطع عرضی به دو صورت انجام می‌شود:

روش اول: در این روش مبدا مختصات بر روی محور قشر اساس در نظر گرفته می‌شود و باید آن را طوری انتخاب کرد که تمام نقاط بالا یا پایین محور xها قرار گیرند و محور y منطبق بر محور راه باشد. همچنین مختصات نقاط بدون علامت جبری آنها در نظر گرفته می‌شود. بر این اساس ترتیب نوشتن اعداد به گونه‌ای است که با در نظر گرفتن مبدا، برای قسمت سمت چپ در جهت عقربه ساعت شروع به نوشتن کسرها نموده بطوری‌که برای مختصات هر نقطه، y در صورت کسر و x در مخرج آن نوشته می‌شود. برای قسمت راست، این عمل در خلاف جهت حرکت عقربه‌های ساعت انجام می‌شود. در نهایت جهت محاسبه مساحت مقطع به صورت زیر عمل می‌شود:

$$\text{مساحت مقطع} = \frac{۱}{۲} \times (\text{مجموع حاصلضرب اعداد واقع در دو سر خط‌چین - مجموع حاصلضرب اعداد واقع در دو سر خط ممتد})$$

در واقع برای شکل ۵-۸ به صورت زیر عمل می‌شود:

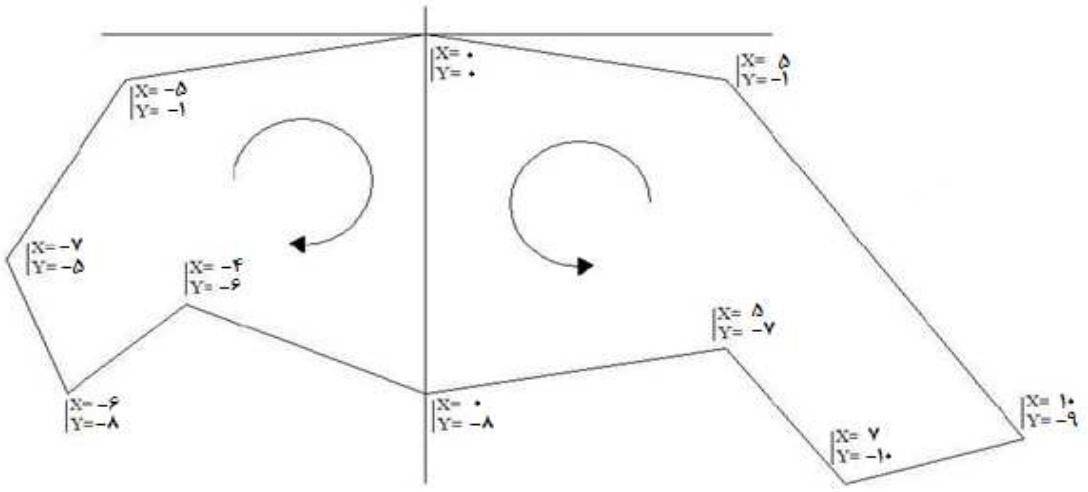
۰	F	$f_۲$	$f_۱$	$h_۱$	e	۰	F	$f_۳$	$f_۴$	$h_۲$	e	۰
۰	۰	$d_۲$	$d_۱$	$d_۱$	b/۲	۰	۰	$d_۳$	$d_۴$	$d_۲$	b/۲	۰



شکل ۵-۸- محاسبه مساحت مقطع عرضی به روش مختصات (روش اول- تقسیم مساحت)

روش دوم: این روش مانند روش اول است با این تفاوت که مختصات نقاط دارای علامت جبری مثبت یا منفی است و از یک نقطه دلخواه مانند A در جهت عقربه‌های ساعت شروع به نوشتن کسرها نموده و در نهایت به همان نقطه A کار ختم می‌شود. در این روش می‌توان مبدا مختصات را در هر نقطه دلخواه انتخاب کرد. همچنین نیاز به تقسیم مساحت‌ها نمی-باشد.

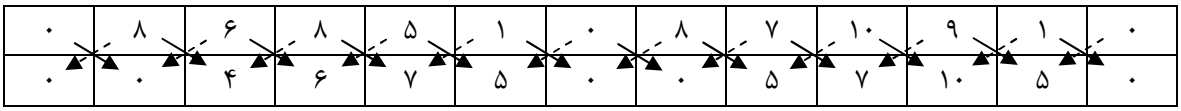
مثال ۱: به روش مختصات مساحت شکل زیر را حساب کنید؟



شکل ۵-۹- مختصات سطح مورد نظر در مثال ۱

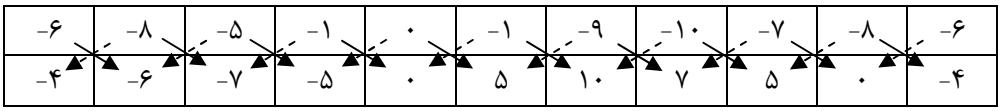
حل:

روش اول:



$$A = ۰/۵ \times [(۰\times۰ + ۸\times۴ + ۶\times۶ + ۸\times۷ + ۵\times۵ + ۱\times۰ + ۰\times۰ + ۸\times۵ + ۷\times۷ + ۱۰\times۱۰ + ۹\times۵ + ۱\times۰)$$
$$-(۰\times۸ + ۰\times۶ + ۴\times۸ + ۶\times۵ + ۷\times۱ + ۵\times۰ + ۰\times۸ + ۰\times۷ + ۵\times۱۰ + ۷\times۹ + ۱۰\times۱ + ۵\times۰)]$$
$$= ۰/۵ \times (۳۸۳ - ۱۹۲) = ۹۵/۵$$

روش دوم:



$$A = ۰/۵ \times [\begin{pmatrix}(-۶)\times(-۶)+(-۸)\times(-۷)+(-۵)\times(-۵)+(-۱)\times(۰)+(۰)\times(۵)+(-۱)\times(۱۰)+(-۹)\times(۷)\\+(-۱۰)\times(۵)+(-۷)\times(۰)+(-۸)\times(-۴)\end{pmatrix}$$
$$-\begin{pmatrix}(-۶)\times(۰)+(-۸)\times(۵)+(-۷)\times(۷)+(-۱۰)\times(۱۰)+(-۹)\times(۵)+(-۱)\times(۰)+(۰)\times(-۵)\\+(-۱)\times(-۷)+(-۵)\times(-۶)+(-۸)\times(-۴)\end{pmatrix}]$$
$$= ۰/۵ \times (۲۶ - (-۱۶۵)) = ۹۵/۵$$

۵-۶-۳- روش ترسیمی

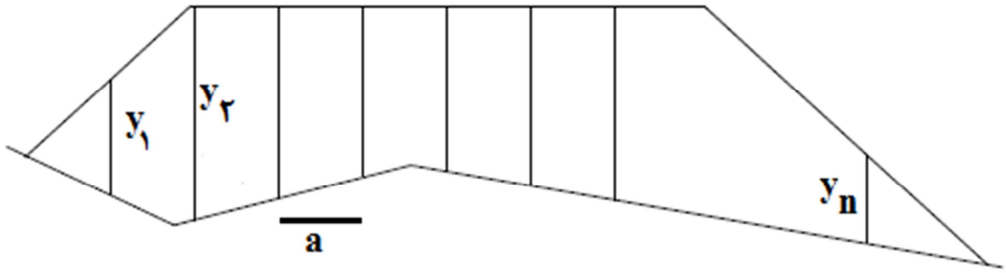
در این روش مقطع عرضی را به هر صورت (منظم یا نامنظم) با مقیاس مناسب رسم کرده و با گذراندن دستگاه پلانیمتر بر روی پیرامون آن، مساحت را محاسبه می‌کنند. به منظور افزایش دقت و هماهنگ کردن آن با کارهای صحرایی معمولا مقاطع عرضی را در مقیاس بزرگ (مثلا $\frac{۱}{۱۰۰}$ یا $\frac{۱}{۲۰۰}$) ترسیم می‌نمایند.

۵-۶-۴- روش تبدیل به سطوح کوچکتر

در این روش با استفاده از خطوط قائم موازی، نیمرخ عرضی را به تعدادی فواصل مساوی (نظیر a) تقسیم می‌کنند، سپس سطح مقطع نیمرخ عرضی را از رابطه ۵-۱۱ بدست می‌آورند. پارامترهای این رابطه در شکل ۵-۱۰ نشان داده شده‌اند.

$$A = \left(\frac{y_۱}{۲} + \frac{y_۱ + y_۲}{۲} + \frac{y_۲ + y_۳}{۲} + ... + \frac{y_{n-۱} + y_n}{۲} + \frac{y_n}{۲}\right) \qquad (۵-۱۱)$$

در واقع در این روش کافی است که بعد از ترسیم مقطع عرضی، طول‌های قائم $y_۱$، $y_۲$، $y_۳$ و غیره را با مقیاس اندازه-گیری کرد و با استفاده از فرمول فوق مساحت نیمرخ عرضی را محاسبه نمود.



شکل ۵-۱۰- روش تبدیل به سطوح کوچکتر جهت محاسبه مساحت مقاطع عرضی

۵-۶-۵- روش پرگار

روش پرگار همان روش تبدیل به سطوح کوچکتر است، با این تفاوت که معمولا اختلاف خط پروژه و خط زمین در فواصل یک متری بوسیله پرگار اندازه‌گیری می‌شود، بنابراین حاصل جمع این اختلاف ارتفاع‌ها مساحت سطح مقطع را می‌دهد. به عبارت دیگر در روش پرگار مقدار a برابر ۱ متر در نظر گرفته می‌شود.

۵-۶-۶- روش شمارش خانه‌های شطرنجی

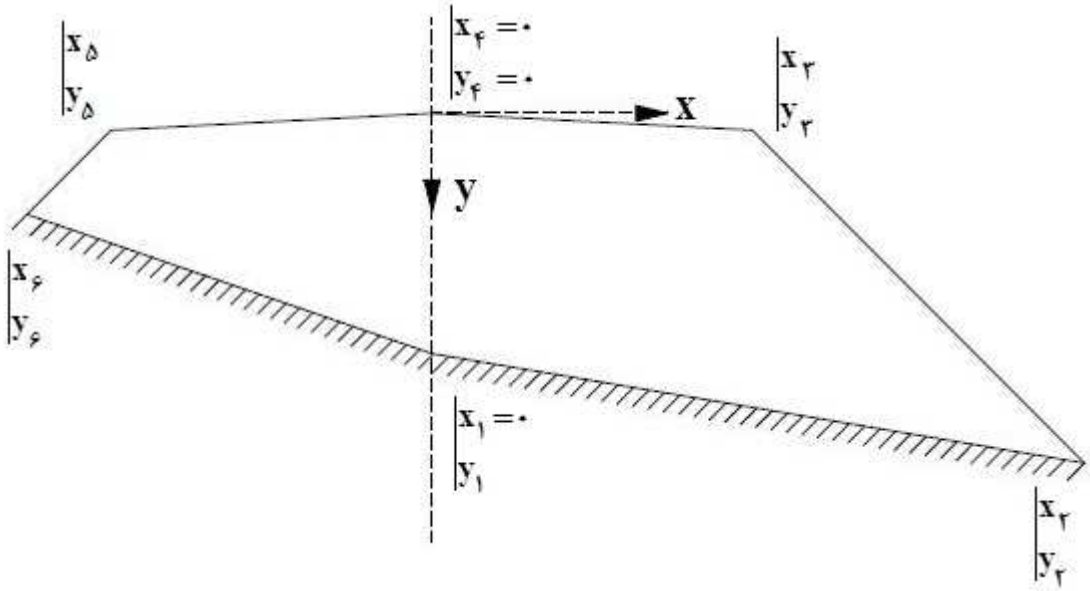
در این روش نیمرخ عرضی را در روی کاغذ شطرنجی رسم می‌کنند و سپس با شمارش خانه‌های نیمرخ، سطوح خاکبرداری و خاکریزی را محاسبه می‌نمایند.

۵-۶-۷- روش استفاده از کامپیوتر

این روش مبتنی بر روش مختصات می‌باشد و جهت انجام آن از کامپیوتر استفاده می‌شود. بر این اساس می‌توان مساحت یک چندضلعی را با تعداد رئوس مختلف (چه در خاکریزی و چه در خاکبرداری) محاسبه نمود. به عنوان مثال برای محاسبه مساحت یک مقطع عرضی که ۶ نقطه آن برداشت شده است (۶ نقطه‌ای)، از رابطه ۵-۱۲ استفاده می‌شود:

$$A=\frac{۱}{۲}[y_۱(X_۶-X_۲)+y_۲(X_۱-X_۳)+y_۳(X_۲-X_۴)+y_۴(X_۳-X_۵)+y_۵(X_۴-X_۶)+y_۶(X_۵-X_۱)] \quad (۱۲-۵)$$

برای این حالت شکل مقطع عرضی و ترتیب نامگذاری رئوس آن به صورت شکل ۵-۱۱ است.



شکل ۵-۱۱- مقطع عرضی ۶ نقطه‌ای و نحوه نامگذاری رئوس آن جهت محاسبه مساحت سطح مقطع

۵-۷- منحنی حمل خاک یا منحنی بروکنر

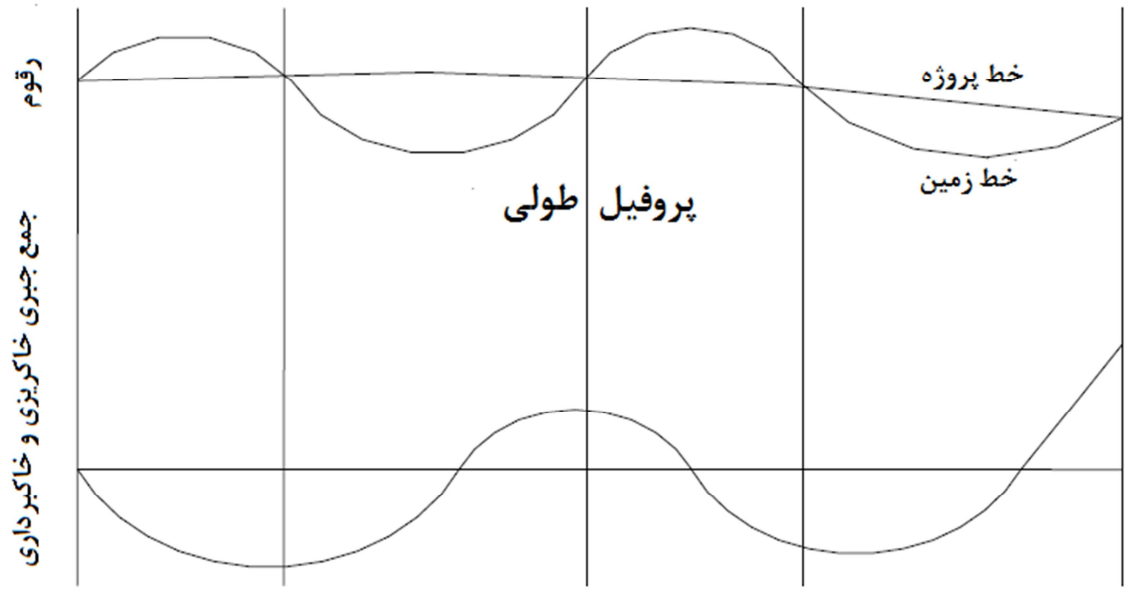
۵-۷-۱- هدف از ترسیم و مطالعه منحنی بروکنر

هدف از رسم و بررسی منحنی بروکنر یافتن خط پخش یا خط توزیعی است که اقتصادی‌ترین حمل خاک را بدست می-دهد. بر این اساس برای رسم منحنی بروکنر در روی محور xها، فاصله از مبدا (با مقیاس پروفیل طولی) و در روی محور yها مجموع جبری خاکریزی و خاکبرداری تا نقطه مورد نظر رسم می‌شود. شکل ۵-۱۲ نحوه تغییرات منحنی بروکنر با توجه به پروفیل طولی (شامل خط زمین و خط پروژه) را نشان می‌دهد. شایان ذکر است که در منحنی بروکنر جمع خاکریزی و انقباض با علامت مثبت (+) و خاکبرداری با علامت منفی (-) نشان داده می‌شود.

جهت مطالعه منحنی بروکنر دو خط مورد استفاده قرار می‌گیرند که شامل خط اساس (پایه) و خط پایان است و به صورت زیر تعریف می‌شوند:

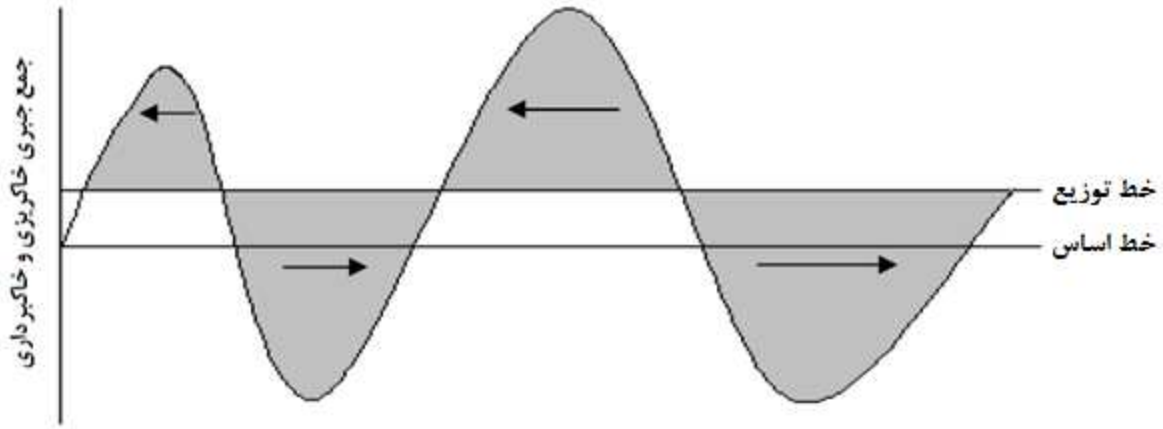
خط اساس: خطی است که منطبق بر محور xها می‌باشد و از مبدا می‌گذرد.

خط پایان: خطی است که موازی با خط اساس است و از نقطه انتهای منحنی بروکنر می‌گذرد.



شکل ۵-۱۲- منحنی بروکنر و پروفیل طولی

با توجه به اینکه در عملیات خاکی حمل خاک از خاکبرداری به طرف خاکریزی انجام می‌گیرد، جهت منحنی بروکنر در بالای خط توزیع همیشه باید از خاکبرداری به خاکریزی یعنی از راست به چپ و جهت منحنی بروکنر در زیر خط توزیع باید از چپ به راست باشد. شکل ۵-۱۳ نحوه انجام این عملیات را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۱۳- نحوه توزیع خاکبرداری در خاکریزی با استفاده از منحنی بروکنر

۵-۷-۲- خصوصیات منحنی بروکنر

خصوصیات اصلی منحنی بروکنر به شرح زیر است:

۱- ارتفاع هر نقطه نشان‌دهنده جمع جبری عملیات خاکی تا آن نقطه است.

۲- منحنی بروکنر در خاکریزی صعودی و در خاکبرداری نزولی است.

۳- نقاط حداکثر منحنی، نقطه تغییر خاکریزی به خاکبرداری و نقاط حداقل منحنی نقطه تغییر خاکبرداری به خاکریزی می‌باشد. به عبارت دیگر حداکثر و حداقل بر روی منحنی بروکنر از تقاطع خط پروژه با پروفیل طولی زمین طبیعی بدست می‌آیند.

۴- هر خط افقی که منحنی بروکنر را در دو نقطه قطع کند به نام خط تعادل موسوم بوده و حجم خاکبرداری وخاکریزی در فاصله بین این دو نقطه مساوی است.

۵- سطح محصور بین منحنی بروکنر و خطوط تعادل عزم حمل را نشان می‌دهد و واحد آن مترمکعب به توان چهار است.

مثال ۲: برای یک مسیر راه میزان حجم خاکریزی و خاکبرداری در فاصله بین مقاطع عرضی برداشت شده که به فواصل ۵۰ متر از یکدیگر قرار دارند، به صورت جدول ۵-۷ بدست آمده است. با فرض آنکه ضریب انقباض برابر با ۱۸٪ باشد، منحنی بروکنر را رسم نمایید.

جدول ۵-۷- احجام خاکریزی و خاکبرداری برآورد شده در طول مسیر راه برای ایستگاه‌های ۱۲۰ تا ۱۲۴ (مثال ۲)

ایستگاه	فاصله بین دو ایستگاه متوالی	فاصله از مبدا	حجم خاکبرداری	حجم خاکریزی
	m	m	m^3	m^3
۱۲۰		۰		
	۵۰		-۶۰۰	۲۴۰۰
۱۲۰+۵۰		۵۰		
	۵۰		۰	۴۰۰۰
۱۲۱		۱۰۰		
	۵۰		-۶۷۰	۵۵۰
۱۲۱+۵۰		۱۵۰		
	۵۰		-۵۳۰۰	۰
۱۲۲		۲۰۰		
	۵۰		-۳۹۰۰	۲۵۰۰
۱۲۲+۵۰		۲۵۰		
	۵۰		-۴۳۰۰	۱۷۰
۱۲۳		۳۰۰		
	۵۰		۰	۶۴۰۰
۱۲۳+۵۰		۳۵۰		
	۵۰		-۵۸۰۰	۳۲۰۰
۱۲۴		۴۰۰		

حل: برای رسم منحنی بروکنر لازم است در ابتدا جدولی به شرح جدول ۵-۸ و شامل موارد زیر تشکیل شود:

ستون ۱- محل نیمرخ عرضی (به طور معمول روی ایستگاه‌ها و گاهی اوقات بین ایستگاه‌ها)

ستون ۲- فاصله بین نیمرخ‌های عرضی مجاور بر حسب متر

ستون ۳- فاصله از مبدا بر حسب متر

ستون ۴- حجم خاکبرداری بر حسب مترمکعب

ستون ۵- حجم خاکریزی بر حسب مترمکعب

ستون ۶- حجم خاکریزی به اضافه مقدار انقباض بر حسب مترمکعب

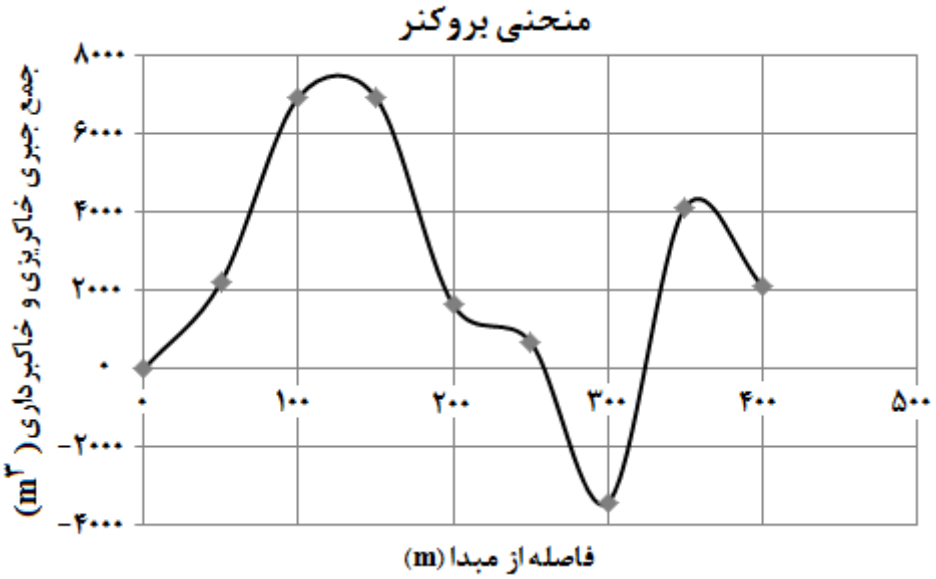
ستون ۷- مازاد عملیات خاکی بر حسب مترمکعب (جمع جبری خاکریزی و خاکبرداری بین دو مقطع عرضی مجاور)

ستون ۸- مجموع جبری خاکبرداری و خاکریزی از مبدا تا نقطه مورد نظر

با تشکیل جدول ۵-۸ و انجام محاسبات مذکور، منحنی بروکنر به صورت شکل ۵-۱۴ رسم می‌گردد.

جدول ۵-۸- محاسبه احجام عملیات خاکی جهت رسم منحنی بروکنر (مثال ۲)

ستون ۱	ستون ۲	ستون ۳	ستون ۴	ستون ۵	ستون ۶	ستون ۷	ستون ۸
ایستگاه	فاصله بین دو ایستگاه متوالی	فاصله از مبدا	حجم خاکبرداری	حجم خاکریزی	خاکریزی + انقباض	مازاد عملیات خاکی	جمع جبری احجام تا نیمرخ مورد نظر
	m	m	m^3	m^3	m^3	m^3	m^3
۱۲۰		۰					۰
	۵۰		-۶۰۰	۲۴۰۰	۲۸۳۲	۲۲۳۲	
۱۲۰+۵۰		۵۰					۲۲۳۲
	۵۰		۰	۴۰۰۰	۴۷۲۰	۴۷۲۰	
۱۲۱		۱۰۰					۶۹۵۲
	۵۰		-۶۷۰	۵۵۰	۶۴۹	-۲۱	
۱۲۱+۵۰		۱۵۰					۶۹۳۱
	۵۰		-۵۳۰۰	۰	۰	-۵۳۰۰	
۱۲۲		۲۰۰					۱۶۳۱
	۵۰		-۳۹۰۰	۲۵۰۰	۲۹۵۰	-۹۵۰	
۱۲۲+۵۰		۲۵۰					۶۸۱
	۵۰		-۴۳۰۰	۱۷۰	۲۰۱	-۴۰۹۹	
۱۲۳		۳۰۰					-۳۴۱۸
	۵۰		۰	۶۴۰۰	۷۵۵۲	۷۵۵۲	
۱۲۳+۵۰		۳۵۰					۴۱۳۴
	۵۰		-۵۸۰۰	۳۲۰۰	۳۷۷۶	-۲۰۲۴	
۱۲۴		۴۰۰					۲۱۱۰



شکل ۵-۱۴- منحنی بروکنر بدست آمده (مثال ۲)

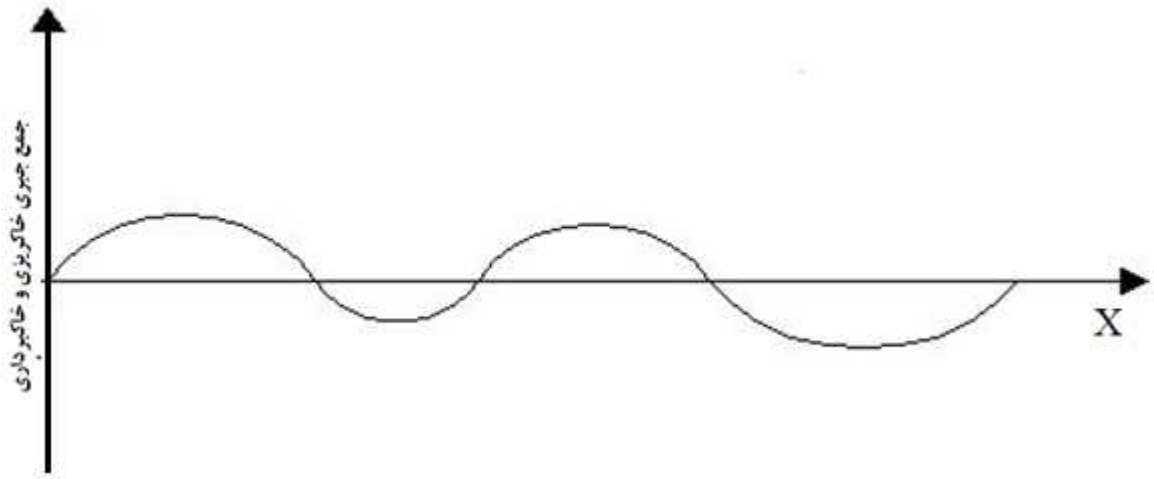
۵-۷-۳- حالات مختلف منحنی بروکنر

سه حالت می‌تواند برای منحنی بروکنر رسم شده برای یک مسیر مشخص رخ دهد. این حالت‌ها به صورت زیر می‌باشند که شکل ۵-۱۵ آنها را نشان می‌دهد.

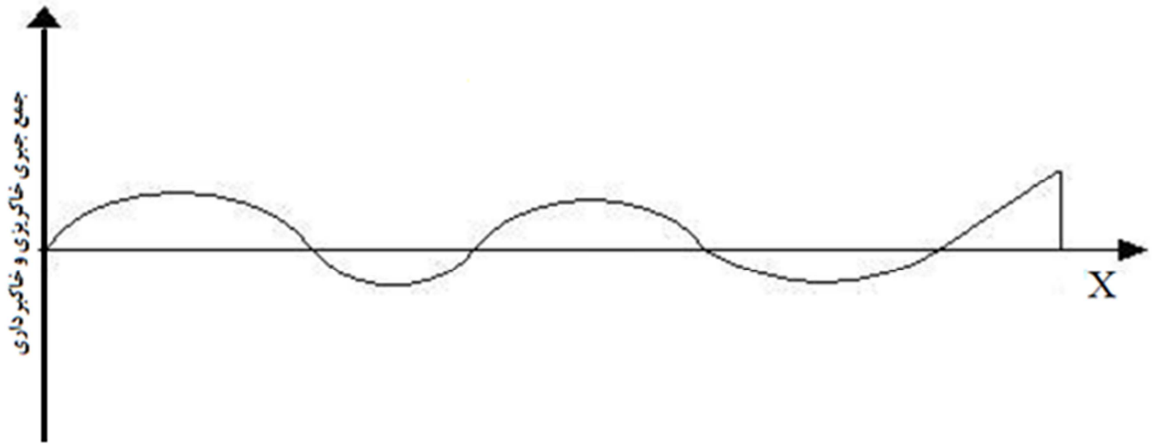
۱- انتهای منحنی بروکنر بر روی محور Xها است. در این صورت تعادل کامل بین حجم خاکبرداری و خاکریزی وجود دارد.

۲- انتهای منحنی بروکنر بالای محور Xها است. در این حالت مقدار خاکریزی بیشتر از مقدار خاکبرداری است و نیاز به قرضه می‌باشد.

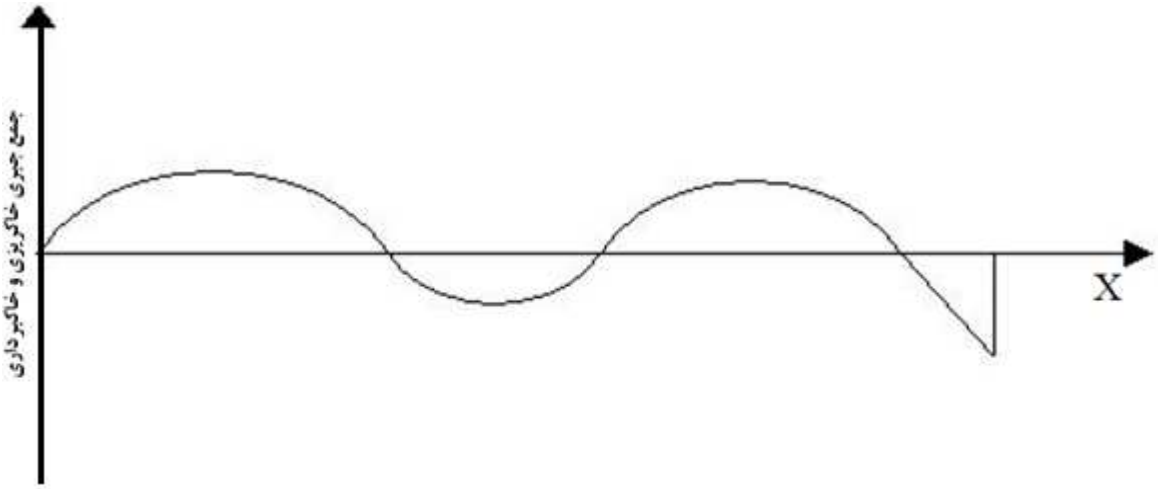
۳- انتهای منحنی بروکنر پایین محور Xها است. در این حالت مقدار خاکبرداری کمتر از مقدار خاکریزی است و لذا لازم است خاک‌های اضافی در محوطه‌ای دپو گردند.



۵-۱۵-۱- حالت انتهای منحنی بروکنر بر روی محور Xها



۵-۱۵-۲- حالت انتهای منحنی بروکنر بالای محور Xها



۵-۱۵-۳- حالت انتهای منحنی بروکنر پایین محور xها

شکل ۵-۱۵- حالات مختلف منحنی بروکنر

۵-۷-۴- انتخاب خط پخش یا خط توزیع

با انتخاب خطی به نام خط پخش یا خط توزیع که ممکن است بر روی خط اساس منطبق باشد و یا در فاصله‌ای موازی با خط اساس باشد، می‌توان عزم خاکبرداری یا خاکریزی را تغییر داد. به عنوان مثال می‌توان با استفاده از خط توزیع کمبود خاکریزی (اضافه خاکبرداری) را که در انتهای پروژه بوجود می‌آید، به ابتدای پروژه منتقل کرد.

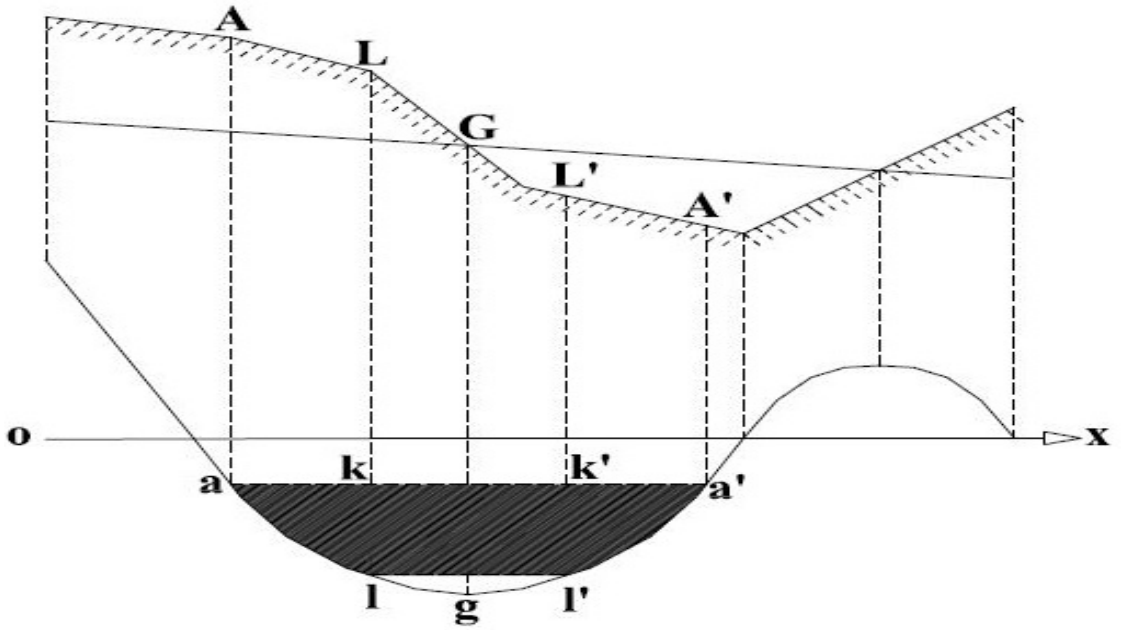
در شکل ۵-۱۶ منحنی بروکنر برای قسمتی از پروفیل طولی مسیر راه رسم گردیده است. با توجه به این شکل طول بین دو خط aa' و ll' یعنی $\overline{lk}$، بیان‌گر مقدار حجم عملیات خاکی بین دو نیمرخ عرضی A و L یا A' و L' است. به عبارت ساده‌تر خط $\overline{lk}$ معرف مقدار حجم خاکبرداری منحنی al است که باید به مصرف خاکریز $a'l'$ که دارای حجمی برابر با $\overline{l'k'}$ است، برسد. بنابراین این حجم خاک باید به فاصله متوسطی برابر با d که از رابطه زیر تعیین می‌شود، حمل گردد:

$$d = \frac{aa'+ll'}{۲} \qquad (۱۳-۵)$$

از آنجایی‌که عزم حمل خاک برابر حاصل‌ضرب حجم خاک در فاصله حمل آن می‌باشد، پس سطح ذوزنقه نشان داده شده در شکل ۵-۱۶، برابر عزم حمل خاک می‌باشد.

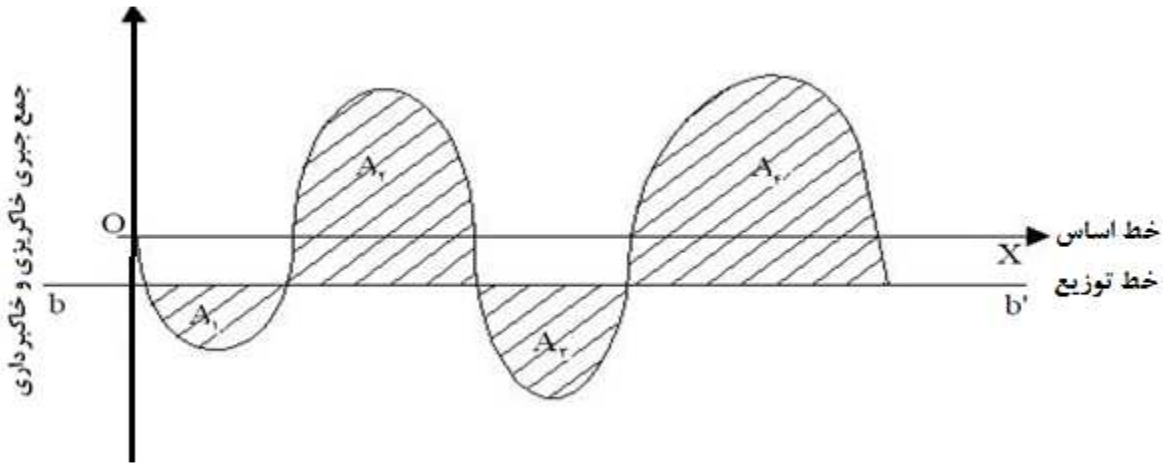
$$\text{عزم حمل} = V \times d = \overline{lk} \times (\frac{\overline{aa'} + \overline{ll'}}{۲}) \qquad (۱۴-۵)$$

این خاصیت در تمام سطوحی که در بالا و یا پایین خط اساس قرار گرفته‌اند، صادق است و سطوح مسدود به خط ox را لنگر یا عزم حمل خاکبرداری یا خاکریزی می‌گویند.



شکل ۵-۱۶- تعیین عزم حمل خاک با توجه به منحنی بروکنر

با توجه به مطالب بیان شده در بالا، انتخاب خط توزیع روی عزم حمل کل اثر می‌گذارد. خط توزیع انتخاب شده باید بین خط اساس و خط پایان واقع باشد و این خط توزیع باید طوری انتخاب شود که عزم حمل کل حداقل گردد. شکل ۵-۱۷ خط توزیع را برای حالتی نشان می‌دهد که بر خط پایان منطبق است. با توجه به این شکل عزم حمل کل برابر حاصل جمع عزم‌های حمل فرعی A_1، A_2، A_3 و A_4 است.

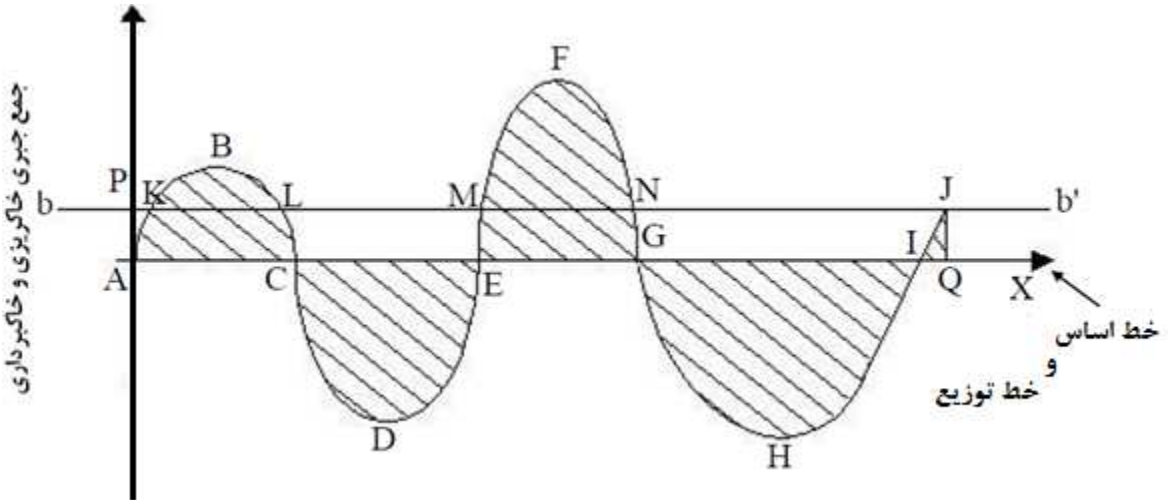


شکل ۵-۱۷- نحوه انتخاب خط پخش (توزیع) در منحنی بروکنر

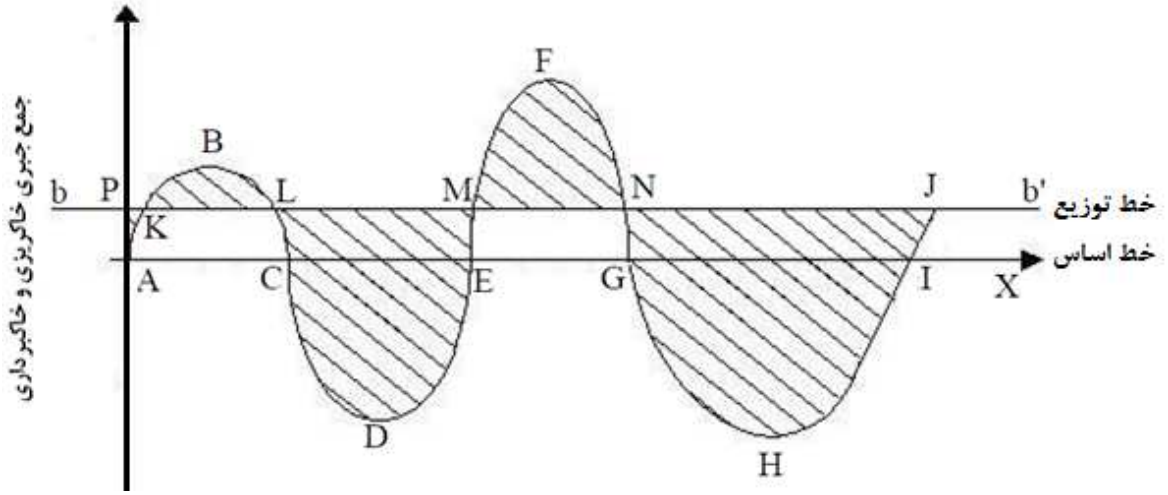
برای روشن شدن نحوه تعیین بهترین خط توزیع، دو وضعیت ذیل در نظر گرفته می‌شود:

۱- خط توزیع بر روی خط اساس قرار گرفته است (شکل ۵-۱۸).

۲- خط توزیع از انتهای منحنی (خط پایان) می‌گذرد (شکل ۵-۱۹).



شکل ۵-۱۸- قرار گرفتن خط توزیع بر روی خط اساس در منحنی بروکنر



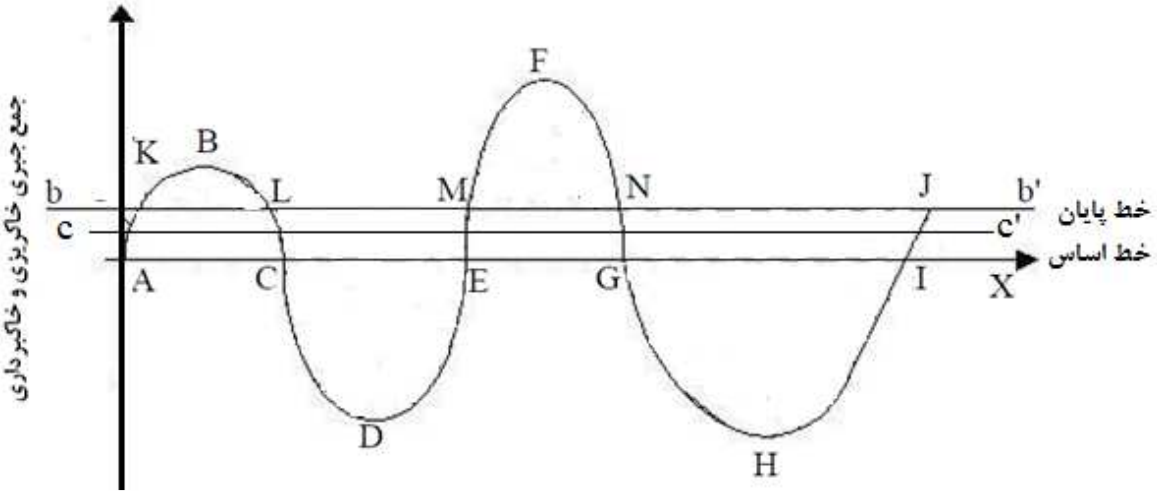
شکل ۵-۱۹- قرار گرفتن خط توزیع بر روی خط پایان در منحنی بروکنر

در دو حالت فوق سطوح KBL و MFN واقع در بالای خط افقی bb' و سطوح GHI و CDE واقع در زیر خط اساس تغییر نمی‌کنند و تنها سطوح AKLC، EMNG، LCEM و NGIJ واقع بین دو خط افقی در تغییر عزم کل دخالت دارند. بنابراین برای مقایسه عزم حمل کل حاصل از خط اساس (ox) و عزم حمل کل حاصل از خط پایان (bb') کافی است که سطوح متغیر زیر با هم سنجیده شوند:

$(AKLC+EMNG)+IJQ$ و $(LCEM+NGIJ)+APK$

هر کدام از سطوح فوق کوچکتر بود خط توزیع مربوط به آن، خط توزیع بهتری است. سطوح فوق را می‌توان با دستگاه پلانیمتر که برای اندازه‌گیری سطوح نامنظم بکار می‌رود، اندازه‌گیری کرد و یا از روش‌های هندسی استفاده نمود.

یکی از حالت‌های دیگر که در واقع حالت کلی می‌باشد، آن است که خط توزیع بین خط اساس و خط پایان (bb') واقع شود. در این حالت مطابق شکل ۵-۲۰، خط توزیع cc' باید طوری تعیین شود که عزم کل حداقل گردد.



شکل ۵-۲۰- قرار گرفتن خط توزیع بین خط اساس و خط پایان در منحنی بروکنر