Azarkish@iust.ac.ir

۴-۴-محاسبه حجم کل 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 فرم کلی صفحه بعد تنظیم می شود. در این جدول با معلوم بودن سطح مقاطع عرضی و فاصله بین آنها (ستونهای ۳، ۴و۵) می توان احجام خاکریزی و خاکبرداری بین دو مقطع متوالی را محاسبه نمود (ستونهای ۶ و۷). علاوه بر این با اعمال ضرایب مناسب می توان اثرات کاهش حجم خاک ناشی از انقباض (مربوط به عملیات خاکریزی) و یا اثرات افزایش حجم خاک ناشی از تورم (مربوط به عملیات خاکبرداری) را در محاسبات لحاظ نمود (ستونهای ۸ و ۹). 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 (+ برای خاکریزی و - برای خاکبرداری) در ستونهای ۱۰ و ۱۱ وارد نمود. به این ترتیب جمع جداگانه اعداد ستونهای ۱۰ و ۱۱ مشخص خواهد نمود که کل عملیات خاکی پرژه شامل چه میزان خاکبرداری و چه میزان خاکریزی می باشد و با مقایسه این مقادیر نیاز پروژه به محل قرضه یا محل دپو معلوم می گردد.

نکته۱: مقاطع عرضی صفر یا مقاطع مجازی وجود خارجی ندارند و فقط برای اعمال دقت بیشتر در محاسبات از آنها استفاده می شود.

نکته۲: حجم کل عملیات خاکی در یک پروژه بستگی به ارتفاع خط زمین و تراز خط پروژه دارد. لذا در صورت عدم تغییر مسیر راه و به ازای یک خط پروژه معین این حجم همواره ثابت خواهد بود.

۴-۵- حمل خاک

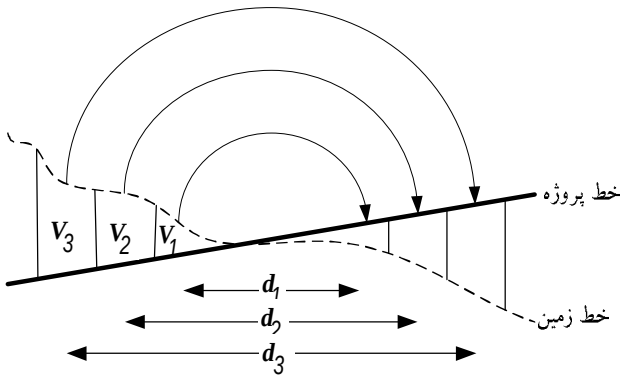
همانطور که قبلاً اشاره شد در پروژه های راهسازی نیمرخهای عرضی مختلفی اعم از خاکبرداری و یا خاکریزی وجود دارد و همواره لازم است تا خاک از نقاط مختلفی از پروژه برداشته شده، به نقاط دیگری از آن ریخته شود. این جابجایی که اصطلاحاً حمل خاک نامیده می شود، از نظر اقتصادی بسیار حائز اهمیت می باشد. نحوه جابجایی خاک بین نقاط مختلف مسیر باید به گونه ای سازماندهی شود که متوسط فاصله حمل خاک در کل پروژه حداقل گردد.

No of Section	Km	Area of Cross -Section		Distance	Embank	Excavate	Emb+Shr	Exc+Swe	Excess Material		Mass Diagram
شماره مقطع عرضی	کیلومتر مقطع عرضی	سطح خاکبرداری (m^2)	سطح خاکریزی (m^2)	فواصل مقاطع عرضی (m)	حجم خاکریزی (m^3)	حجم خاکبرداری (m^3)	حجم خاکریزی + ۱۵٪ انقباض (m^3)	حجم خاکبرداری + ۵٪ تورم (m^3)	اضافه حجم در		جمع جبری خاکبرداری و خاکریزی از ابتدای مسیر تا محل مقطع مورد نظر
									خاکبرداری −	خاکریزی +	
۱	۰+۰۰۰	۰/۶	۱								۰
۲	۰+۰۵۰	۰	۲/۴	۵۰	۳	۸۵	۳/۴۵	۸۹/۲۵	−۸۵/۸		−۸۵/۸
۳	۰+۱۰۰	۰	۳	۵۰	۰	۱۳۵	۰	۱۴۱/۷۵	−۱۴۱/۷۵		−۲۲۷/۵۵
۴	۰+۱۵۰	۰	۳/۵	۵۰	۰	۱۶۲/۵	۰	۱۷۰/۶۲۵	−۱۷۰/۶۲۵		−۳۹۸/۱۷۵
مقطع صفر	۰+۱۹۳/۷۵	۰	۰	۴۳/۷۵	۰	۷۶/۵۶۳	۰	۸۰/۳۹	−۸۰/۳۹		−۴۷۸/۵۶۵
۵	۰+۲۰۰	۰/۵	۰	۶/۲۵	۱/۵۶۳	۰	۱/۸	۰		+۱/۸	−۴۷۶/۷۶۵
۶	۰+۲۵۰	۲/۶	۰	۵۰	۷۷/۵	۰	۸۹/۱۲۵	۰		+۸۹/۱۲۵	−۳۸۷/۶۴
۷	۰+۳۰۰	۳/۲	۰	۵۰	۱۴۵	۰	۱۶۶/۷۵	۰		+۱۶۶/۷۵	−۲۲۰/۸۹
۸	۰+۳۵۰	۱/۲	۰/۸	۵۰	۱۱۰	۴	۱۲۶/۵	۴/۲		+۱۲۲/۳	−۹۸/۵۹
۹	۰+۴۰۰	۰/۳	۲	۵۰	۳۷/۵	۷۰	۴۳/۱۲۵	۷۳/۵	−۳۰/۳۷۵		−۱۲۸/۹۶۵
۱۰	۰+۴۵۰	۰	۳/۷	۵۰	۰/۵۶	۱۴۲/۵	۰/۶۴۴	۱۴۹/۶۲۵	−۱۴۸/۹۸۱		−۲۷۷/۹۴۶
۱۱	۰+۵۰۰	۰	۴	۵۰	۰	۱۹۲/۵	۰	۲۰۲/۱۲۵	−۲۰۲/۱۲۵		−۴۸۰/۰۷۱
مقطع صفر	۰+۵۴۰	۰	۰	۴۰	۰	۸۰	۰	۸۴	−۸۴		−۵۶۴/۰۷۱
۱۲	۰+۵۵۰	۱	۰	۱۰	۵	۰	۵/۷۵	۰		+۵/۷۵	−۵۵۸/۳۲۱
۱۳	۰+۶۰۰	۲/۳	۰	۵۰	۸۲/۵	۰	۹۴/۸۷۵	۰		+۹۴/۸۷۵	−۴۶۳/۴۴۶
۱۴	۰+۶۵۰	۴/۱	۰	۵۰	۱۶۰	۰	۱۸۴	۰		+۱۸۴	−۲۷۹/۴۴۶
۱۵	۰+۷۰۰	۲/۵	۰	۵۰	۱۶۵	۰	۱۸۹/۷۵	۰		+۱۸۹/۷۵	−۸۹/۶۹۶
۱۶	۰+۷۵۰	۱/۹	۰	۵۰	۱۱۰	۰	۱۲۶/۵	۰		+۱۲۶/۵	+۳۶/۸۰۴
۱۷	۰+۸۰۰	۱/۵	۰	۵۰	۸۵	۰	۹۷/۷۵	۰		+۹۷/۷۵	+۱۳۴/۵۵۴
۱۸	۰+۸۵۰	۱	۰	۵۰	۶۲/۵	۰	۷۱/۸۷۵			+۷۱/۸۷۵	+۲۰۶/۴۲۹
				اضافه حجم عملیات خاکی به تفکیک خاکبرداری و خاکریزی					۹۴۴/۰۴۶	۱۱۵۰/۴۷۵	

۴-۵-۱-عزم حمل و فاصله حمل متوسط

قطعه‌ای از پروفیل طولی مسیر را به صورت شکل زیر در نظر بگیرید. ملاحظه می شود که برای جابجایی خاک از خاکبرداری به خاکریز، لازم است تا حجم V_1 به فاصله d_1، حجم V_2 به فاصله d_2 و بطور کلی حجم V_i به فاصله d_i جابجا شود. حاصل ضرب حجم خاک در فاصله جابجایی آن را از دیدگاه فیزیکی می توان به صورت یک کار مکانیکی در نظر گرفت که اصطلاحاً عزم حمل یا لنگر حمل نامیده می شود. لذا در صورتی که مجموع عزم حمل های جزء را که به آن عزم حمل کل گفته می شود، بر مجموع حجمهای جابجا شده تقسیم کنیم، فاصله حمل متوسط خاک از رابطه زیر بدست می آید:

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

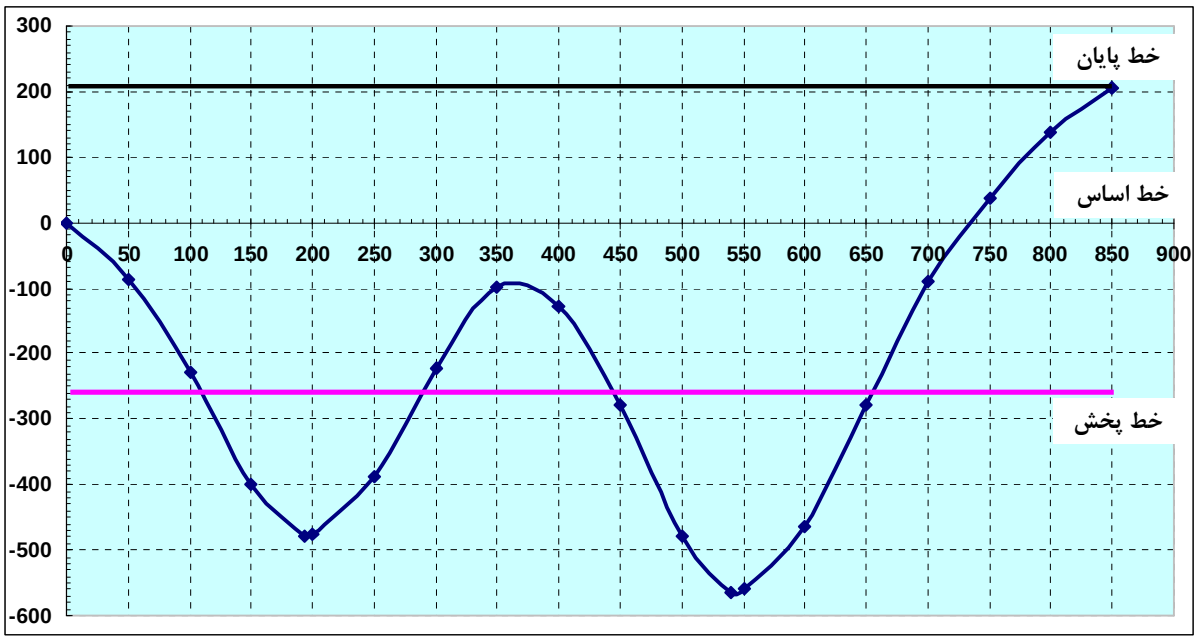


نمایش نحوه جابجایی خاک از خاکبرداری به خاکریزی در قطعه ای از پروژه

هر چه فاصله حمل متوسط خاک کمتر باشد، هزینه عملیات خاکی پروژه نیز کمتر می شود. بر اساس رابطه فوق تنها یک راه حل برای حداقل نمودن فاصله حمل متوسط وجود دارد و آن کاهش صورت کسر و یا عزم حمل کل می باشد. لازم به یادآوری است که مخرج کسر و یا حجم عملیات خاکی در یک پروژه مقداری ثابت است و تنها با تغییر مسیر راه یا تغییر خط پروژه می توان این حجم را تغییر داد.

۴-۵-۲- منحنی بروکنر

برای دستیابی به اقتصادی ترین نحوه جابجایی خاک و تعیین حداقل فاصله حمل متوسط خاک در یک پروژه راهسازی از روش منحنی بروکنر استفاده می شود. برای رسم منحنی بروکنر می توان کیلومتر مقاطع عرضی (اعداد ستون ۲ جدول محاسبات عملیات خاکی) را روی محور افقی و جمع جبری ارائه شده در ستون ۱۲ این جدول 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 محاسبات ممکن است متغیر باشد. در شکل زیر منحنی بروکنر مربوط به اعداد مندرج در جدول محاسبات نمونه رسم شده است.



نکات مهم: با توجه به ثابت بودن حجم عملیات خاکی در یک پروژه، شکل هندسی منحنی بروکنر نیز قابل تغییر نیست. در این منحنی:

الف) به محور افقی، خط پایه یا خط اساس گفته می شود.

ب) جهت مثبت محور عمودی بیانگر عملیات خاکریزی و جهت منفی آن بیانگر عملیات خاکبرداری است. لذا طول شاخه های صعودی منحنی بروکنر، محدوده عملیات خاکریزی و طول شاخه های نزولی آن محدوده عملیات خاکبرداری را مشخص می کند. همچنین مجموع ارتفاع شاخه های صعودی منحنی بروکنر، حجم کل عملیات خاکریزی و مجموع ارتفاع شاخه های نزولی آن، حجم کل عملیات خاکبرداری را نشان می دهد.

ج)نقاط ماکزیمم یا مینیمم منحنی بروکنر، نقاطی هستند که عملیات خاکبرداری به خاکریزی(یا بالعکس) تبدیل می شود. این نقاط معمولاً در محل برخورد خط پروژه با خط زمین(مقطع عرضی صفر یا در مواردی مقطع عرضی مختلط) واقع می شوند.

د)به خطی که از انتهای منحنی بروکنر به موازات خط اساس رسم گردد، خط پایان گفته می شود. موقعیت این خط بر حسب مورد می تواند در بالا، پایین و یا منطبق بر خط اساس باشد.

ه)اگر خط پایان در بالای خط اساس قرار گیرد، اضافه حجم عملیات خاکی پروژه از نوع خاکریزی است و پروژه نیازمند قرضه می باشد.

و)اگر خط پایان در پایین خط اساس قرار گیرد، اضافه حجم عملیات خاکی پروژه از نوع خاکبرداری است و پروژه نیازمند دپو می باشد.

ز)اگر خط پایان منطبق بر خط اساس قرار گیرد، حجم عملیات خاکبرداری و خاکریزی کل پروژه با هم در تعادل می باشد.

ح)نقاطی که منحنی بروکنر خط اساس را قطع می کند، نقاط تعادل نامیده می شود؛ زیرا جمع جبری احجام خاکبرداری و خاکریزی در این نقاط برابر صفر می باشد. به عبارت دیگر در هر سطح مسدود بین منحنی بروکنر و خط اساس، مقدار خاکبرداری با خاکریزی مساوی است.

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

ی)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 نزولی(خاکبرداری) هر قطعه به سمت شاخه صعودی(خاکریزی) آن حمل داد. با رعایت این اصل هر خط پخش مفروض شیوه ای را برای جابجایی خاک پیشنهاد می کند و جهت جابجایی خاک در سطوح فوقانی خط پخش از راست به چپ و در سطوح تحتانی آن از چپ به راست خواهد بود.

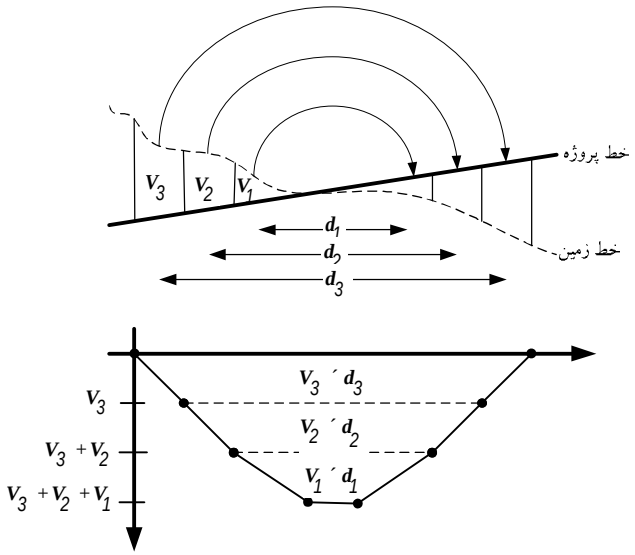
ک)مسلم است که با تغییر خط پخش، مرزهای جابجایی خاک و فاصله حمل متوسط خاک دستخوش تغییر می شود. از اینرو می توان انتظار داشت که به ازای یک خط پخش بهینه، متوسط فاصله حمل خاک حداقل گردد. در ادامه خواهیم دید که اگر مجموع قاعده سطوح فوقانی خط پخش با مجموع قاعده سطوح تحتانی آن برابر شود، خط پخش مفروض، بهینه خواهد بود و در صورت جابجایی خاک مطابق با الگوی ارائه شده توسط خط پخش بهینه، متوسط فاصله حمل خاک حداقل می گردد.

۴-۵-۳-روشهای ترسیم خط پخش بهینه

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

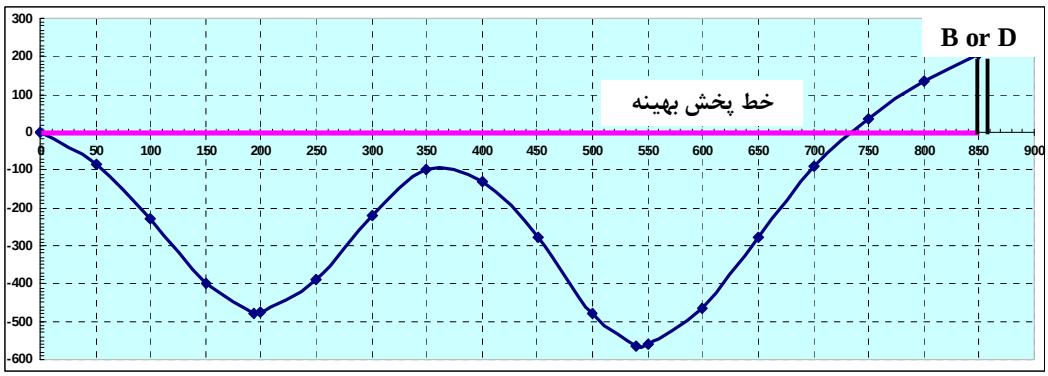
الف) سطح واقع بین منحنی بروکنر و خط پخش مفروض (که در اینجا منطبق بر خط اساس می باشد) برابر با عزم حمل خاک در قطعه مورد نظر می باشد.

ب) ارتفاع سطح واقع بین منحنی بروکنر و خط پخش مفروض برابر با حجم عملیات خاکی در قطعه مورد نظر می باشد.

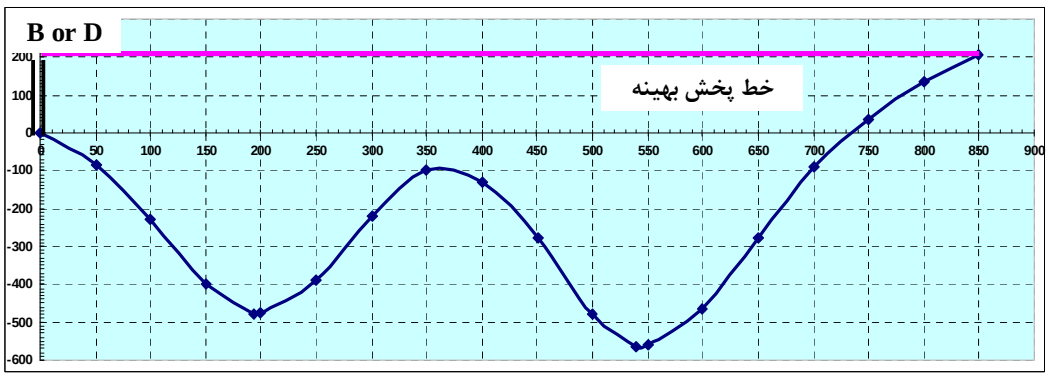


استفاده از این نکات در فرمول ارائه شده برای متوسط فاصله حمل خاک، این نتیجه را به همراه خواهد داشت که برای حداقل شدن فاصله حمل متوسط خاک باید عزم حمل کل یا مجموع مساحت سطوح واقع بین منحنی بروکنر و خط پخش مفروض حداقل شود. زیرا حجم کل عملیات خاکی پروژه مقداری ثابت است و لذا مجموع ارتفاع سطوح واقع بین منحنی بروکنر و خطوط پخش مختلف همواره ثابت می ماند. در چنین شرایطی طبق یک قضیه هندسی، حداقل مجموع مساحتها در صورتی حاصل می شود که مجموع قاعده سطوح فوقانی خط پخش با مجموع قاعده سطوح تحتانی آن برابر باشد. 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 محلهای قرضه و دپو نداشته باشیم. زیرا در غیر این صورت موقعیت خط پخش بهینه به محل قرضه یا دپوهای موجود در طول پروژه نیز بستگی دارد و بر حسب مورد ممکن است با یکی از حالتهای ذیل مواجه شویم:

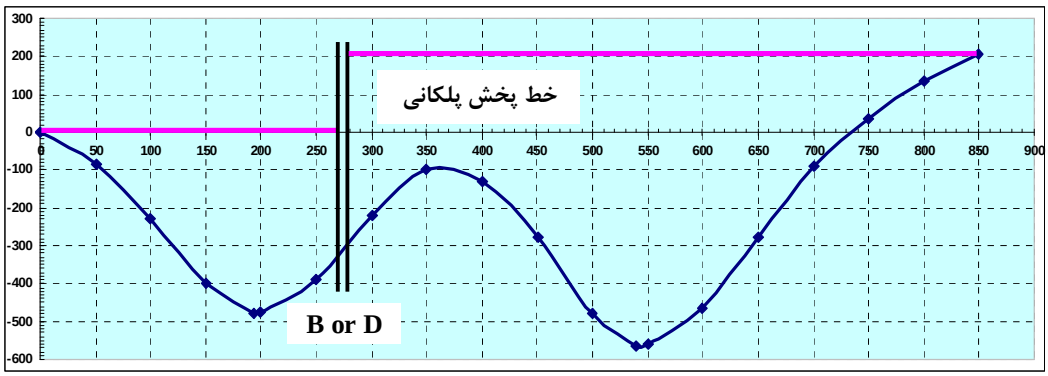
الف) محل قرضه یا دپو در انتهای پروژه واقع شده است؛ این شرایط به معنی آن است که در حد فاصل ابتدا تا انتهای پروژه، تنها یک محل برای تامین کمبود خاک (**B**) یا ذخیره مازاد آن (**D**) وجود دارد و آن هم در انتهای مسیر واقع شده است. لذا خط پخش بهینه خواهد بود که به ازای آن قرضه یا دپوی ابتدای مسیر برابر صفر گردد. مطابق شکل این خط پخش منطبق بر خط اساس خواهد بود.



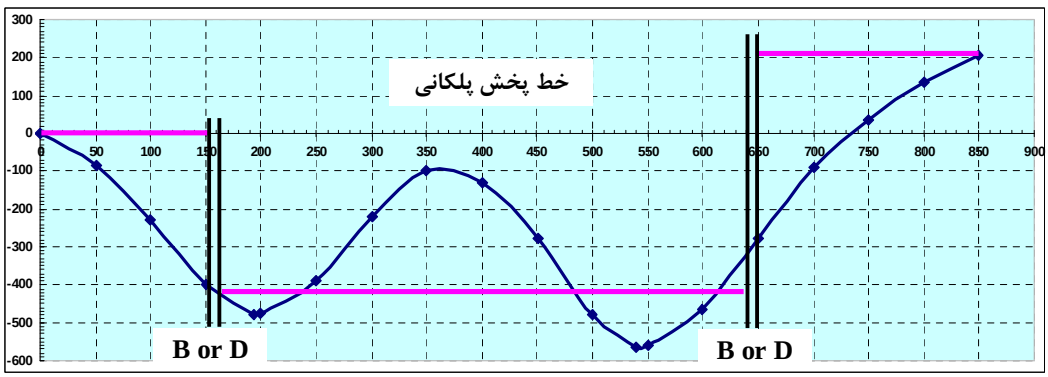
ب) محل قرضه یا دپو در ابتدای پروژه واقع شده است؛ این شرایط به معنی آن است که در حد فاصل ابتدا تا انتهای پروژه، تنها یک محل برای تامین کمبود خاک (**B**) یا ذخیره مازاد آن (**D**) وجود دارد و آن هم در ابتدای مسیر واقع شده است. لذا خط پخش بهینه خواهد بود که به ازای آن قرضه یا دپوی انتهای مسیر برابر صفر گردد. مطابق شکل این خط پخش منطبق بر خط پایان خواهد بود.

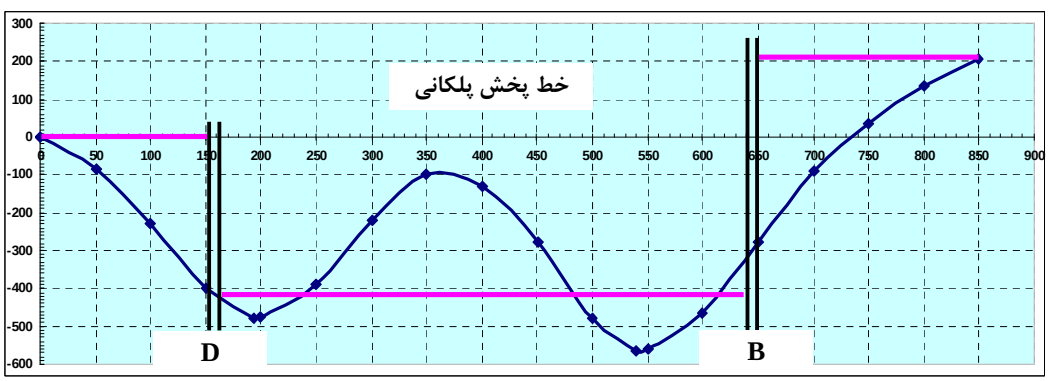


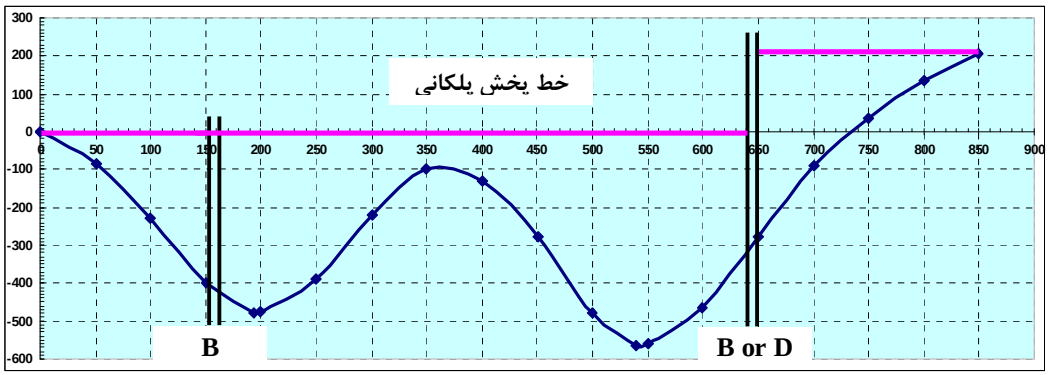
ج) محل قرضه یا دپو در حد فاصل ابتدا و انتهای پروژه واقع شده است؛ این شرایط به معنی آن است که تنها یک محل برای تامین کمبود خاک (B) یا ذخیره مازاد آن (D) در حد فاصل ابتدا تا انتهای پروژه وجود دارد. لذا برای قطعه اول، خط پخش بهینه منطبق بر خط اساس و برای قطعه دوم، خط پخش بهینه منطبق بر خط پایان خواهد بود. به چنین خط پخشی اصطلاحاً خط پخش پلکانی گفته می شود.



د) در حد فاصل ابتدا و انتهای پروژه چند محل قرضه یا دپو واقع شده است؛ این شرایط به معنی آن است که در حد فاصل ابتدا تا انتهای پروژه بیش از یک محل برای تامین کمبود خاک (B) یا ذخیره مازاد آن (D) وجود دارد. در چنین شرایطی خط پخش بهینه قطعه اول منطبق بر خط اساس، خط پخش بهینه قطعه آخر منطبق بر خط پایان و خط پخش بهینه قطعات میانی از روش برابری مجموع قاعده سطوح فوقانی و تحتانی بدست خواهد آمد. به چنین خط پخشی نیز خط پخش پلکانی گفته می شود.







۴-۶-اصلاح منحنی بروکنر بر اساس فاصله جانبی محلهای قرضه و دپو

موقعیت واقعی محلهای قرضه و دپو معمولاً در فاصله مشخصی از طرفین محور راه قرار دارد و دسترسی به آنها از طریق احداث یک راه ارتباطی انجام می شود. این مساله فاصله اضافی رفتن به دپو یا آمدن از قرضه را به فاصله حمل خاک اضافه می کند. از اینرو با اصلاح منحنی بروکنر می توان این فاصله اضافی را نیز در تعیین متوسط فاصله حمل خاک لحاظ نمود. برای اصلاح منحنی بروکنر می توان فاصله راه دسترسی به محل قرضه و یا دپو را به صورت مجازی به کیلومتراژ مسیر اضافه نمود و در طول این فواصل منحنی بروکنر را به موازات خط اساس امتداد داد. ترسیم خط پخش بهینه بر روی منحنی بروکنر اصلاح شده نیز به روشهای قبل قابل انجام می باشد. برای مثال اگر در منحنی بروکنر فوق محل قرضه و دپوی مورد استفاده در فاصله ۱۰۰ متری از کیلومتر ۶۵۰+.. واقع باشد، منحنی به صورت زیر اصلاح می شود.