

## تعیین حجم عملیات خاکی مسیر کانال‌های روباز با استفاده از شبکه مثلثی نامنظم

### احسان روشنی<sup>۱</sup> و \*صلاح کوچکزاده<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران، <sup>۲</sup>استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران

تاریخ دریافت: ۸۴/۹/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۸۷/۸/۱۱

### چکیده

عملیات خاکی در زمره فعالیت‌های اساسی و پرهزینه پروژه‌های آبیاری و زهکشی می‌باشد. با وجود این روش‌های برآورد حجم عملیات که تاکنون ارائه شده و در دفاتر مهندسان مشاور به کار می‌روند، کم‌دقت و بسیار وقت‌گیر می‌باشند. در این مقاله روش محاسبه جدیدی ارائه شده است که زمین و سطح کانال را با شبکه مثلثی نامنظم شبیه‌سازی می‌کند، به کمک روش عددی نیوتن رافسون رقوم بهینه خط پروژه کانال محاسبه می‌شود. مقایسه نتایج عددی روش پیشنهادی با نتایج روش‌های متداول برای یک مثال که دارای حل تحلیلی است نشان می‌دهد که روش جدید دقت محاسبات را به میزان حدود سه برابر افزایش داده است. بنابراین با به کار بردن روش پیشنهادی علاوه بر افزایش دقت محاسبات حجم عملیات خاکی که می‌تواند اثر مستقیم در افزایش دقت محاسبه هزینه‌های طرح داشته باشد، می‌توان رقوم خط پروژه کانال را با توجه به حجم عملیات خاکی بهینه کرد.

**واژه‌های کلیدی:** کانال، محاسبه عملیات خاکی، نقشه‌برداری، نیوتن رافسون

### مقدمه

محاسبه و پیش‌بینی هزینه‌های اجرایی طرح‌های آبیاری و زهکشی جهت تصمیم‌گیری کارفرمایان این طرح‌ها اهمیت بسیاری دارد. پرهزینه‌ترین بخش اجرایی این پروژه‌ها انجام عملیات خاکی آنها می‌باشد. بنابراین محاسبه دقیق‌تر این حجم به تصمیم‌گیری بهتر کمک شایانی خواهد کرد. از سوی دیگر ممکن است در یک پروژه آبیاری و زهکشی گزینه‌های متعددی مطرح شوند که انتخاب گزینه مناسب به مقایسه اقتصادی بین بستگی دارد. برآورد اقتصادی وابستگی زیادی به محاسبه حجم

عملیات خاکی خواهد داشت. در اغلب گزینه‌های مطرح برای یک پروژه ممکن است اختلاف موجود بین حجم عملیات خاکی از درصد خطای محاسبات این حجم کمتر باشد. بنابراین تصمیم‌گیری براساس این محاسبات به انتخاب طرح بهینه منجر نخواهد شد.

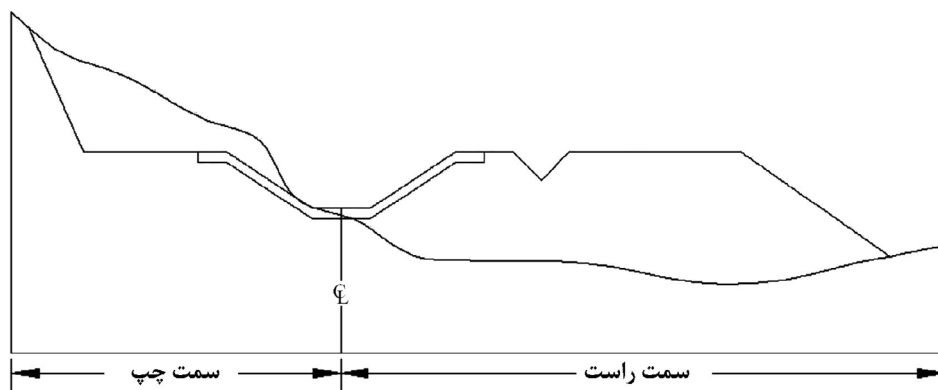
از سوی دیگر با توجه به مشارکت سه بخش کارفرما، مهندس مشاور و پیمانکار در ساخت و اجرای یک شبکه آبیاری و زهکشی، به دلیل عدم دقت در برآوردهای اولیه مشاور که ناشی از استفاده از روش‌های کم‌دقت است و در نهایت به برآورد اقتصادی اشتباه می‌انجامد پیمانکار ضرر کرده و جهت جبران این ضرر مشاور و کارفرما از طرق مختلفی (قانونی و یا غیرقانونی) اقدام می‌کنند. حال

همکاران، ۱۹۷۳؛ کوچکزاده و روشنی، ۲۰۰۴) اما تعیین حجم عملیات خاکی کانال‌ها همچنان بر روش‌های متداول استوار است.

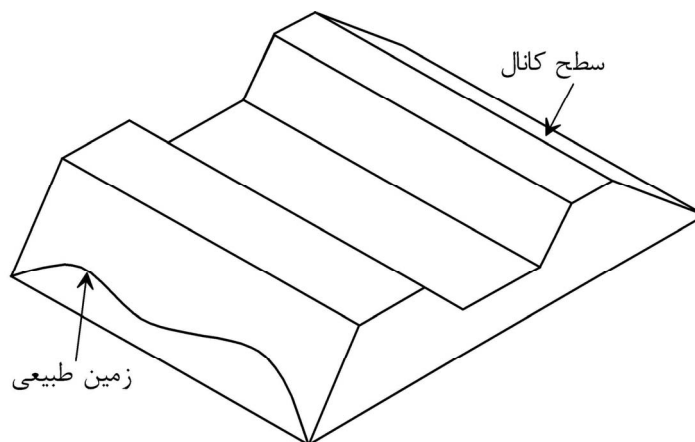
روش متداول محاسبه حجم عملیات خاکی: جهت محاسبه حجم عملیات خاکی، روش متداول استفاده از برداشت عرضی است روش برداشت عرضی بدین صورت است که در ابتدا با استفاده از نقشه‌برداری مقاطع عرضی (عمود بر مسیر) را برداشت می‌کنند (شکل ۱). سپس مقطع خاک‌برداری و یا خاک‌ریزی را بر روی آن مشخص کرده مساحت سطح را محاسبه می‌کنند (افشار و مارینو، ۱۹۹۲).

با استفاده از این روش از ابتدا با افزایش دقت محاسبات، بروز این‌گونه اختلاف‌ها به پایین‌ترین حد ممکن خواهد رسید.

با توجه به حجم بالای پروژه‌های آبیاری و زهکشی در کشور لازم است در بر آورد عملیات خاکی دقت بیشتری اعمال شود تا هم بر آورد مالی واقعی تر شده و هم به طراحی مطلوب‌تری دسترسی پیدا کرد. محاسبه حجم عملیات خاکی در طرح‌های تسطیح اراضی پروژه‌های آبیاری و زهکشی توجه محققان مختلفی را از دیر باز به خود جلب کرده است و روش‌های مختلفی برای محاسبه و بهبود دقت آن پیشنهاد شده است. (اندرسون، ۱۹۸۰؛ عیسی، ۱۹۸۹؛ راجو، ۱۹۶۰؛ سکالویی و ویلاردسون، ۱۹۸۶؛ شیه و کریز، ۱۹۷۱؛ سویل و



شکل ۱- مقطع عرضی کانال و زمین.



شکل ۲- منشور تشکیل شده برای محاسبه حجم عملیات خاک.

روش پیشنهادی در این مقاله به گونه‌ای است که خطای یاد شده را به حداقل می‌رساند. در این روش ابتدا با استفاده از نقاط نقشه‌برداری شده یک شبکه مثلثی نامنظم تشکیل می‌شود. سپس با استفاده از مسیر کانال و خط پروژه ابتدایی و همچنین مقطع تیپ کانال (که توسط طراح ترسیم شده است) زمین بعد از اجرای کانال، تبدیل به صفحاتی با معادله مشخص می‌گردد در نهایت با استفاده از روش **Composite** حجم عملیات خاکی محاسبه خواهد شد. در این مقاله از روش نیوتن رافسون برای تعیین موقعیت مطلوب خط پروژه کانال بهره گرفته شده است.

**روش Composite:** مبانی محاسبات این روش استفاده از منشورهای مثلثی با حداقل حجم ممکن است. برای محاسبه حجم یک جسم لازم است مساحت سطوح ابتدا و انتها و نیز فاصله رئوس این سطوح از یکدیگر را داشته باشیم. بنابراین در مرحله اول باید سطوح ابتدایی و انتهایی را تشکیل دهیم.

تشکیل این سطح برای زمین بعد از اجرای کانال ساده است زیرا این سطح شامل چند صفحه با شیب‌های ثابت است. اما سطح زمین طبیعی را به دلیل وجود ناهمواری‌ها، نمی‌توان با یک صفحه با شیب‌های ثابت مدل کرد (شکل ۳). از نظر عددی این سطح را می‌توان به بی‌نهایت صفحه با شیب‌های متغیر تقسیم کرد که هر چه مساحت این سطوح کوچک‌تر باشد شکل کلی به دست آمده به شکل سطح اصلی نزدیک‌تر خواهد بود. در نقشه‌برداری نقاط با تراکم خاصی برداشته می‌شوند. بنابراین صفحات را تا زمانی می‌توان کوچک کرد که حداقل سه نقطه نقشه‌برداری شده برای محاسبه شیب‌های صفحه درون آن قرار گیرد (شکل ۴). بنابراین اولین مرحله، ایجاد این صفحات و تشکیل مدل زمین واقعی است. این صفحات کنار هم را که برای تشکیل مدل زمین واقعی ایجاد شده‌اند از این پس سطح زمین طبیعی می‌نامیم. (شکل ۴) نمونه‌ای از این سطح را نشان می‌دهد.

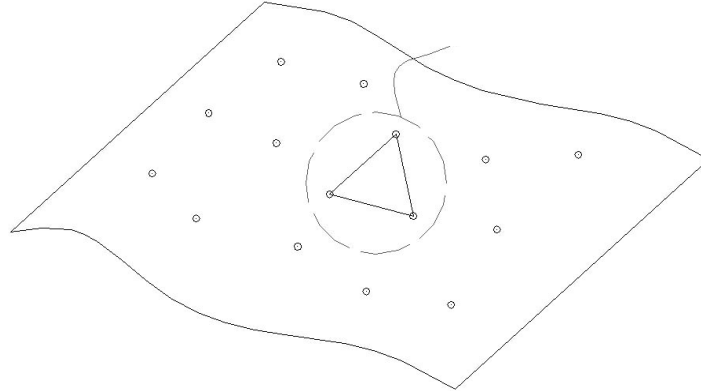
با استفاده از سطوح محاسبه شده منشورهای نامنظمی ایجاد می‌شود و در نهایت با محاسبه حجم این منشورها حجم عملیات خاکی محاسبه خواهد شد. استفاده از این روش بسیار وقت‌گیر بوده و از سوی دیگر به دلیل لحاظ نکردن تغییرات (پستی و بلندی‌ها) موضعی سطح زمین در بین مقاطع خطای زیادی وارد محاسبه‌ها می‌شود. نمونه‌ای از این منشورها را در شکل ۲ مشاهده می‌کنید. از سوی دیگر استفاده از این روش به برداشت مقاطع عرضی به وسیله نقشه‌برداری بستگی دارد که هزینه زیادی را به خود اختصاص می‌دهد.

به دلایل مختلفی در عمل حجم خاک‌برداری را باید بیشتر از حجم خاک‌ریزی در نظر گرفت. در قسمت خاک‌ریزی بر اثر عبور ماشین‌آلات، خاک فشرده می‌شود به طوری که سبب می‌شود خاک‌برداری را افزایش دهند (ابن جلال، ۱۹۹۸؛ آژانس حفاظت خاک آمریکا، ۱۹۶۱) بنابراین تعیین رقم خط پروژه باید به گونه‌ای صورت گیرد که نسبت خاک‌برداری به خاک‌ریزی خاصی به دست آید. برای محاسبه این نسبت طراحان اغلب با آزمون و خطا سعی می‌کنند رقم خط پروژه را محاسبه کنند بدین صورت که ابتدا خط پروژه فرضی را با استفاده از تجربه رسم می‌کنند سپس حجم عملیات خاکی را براساس روش مقطع عرضی محاسبه می‌کنند. اگر نسبت خاک‌برداری به خاک‌ریزی محاسبه شده با نسبت مورد نیاز برابر بود که طراحی خط پروژه اولیه صحیح بوده است در غیر این صورت کانال را به گونه‌ای تغییر می‌دهند که به نسبت مورد نظر برسند. این روند بسیار وقت‌گیر بوده به همین دلیل اغلب از آن صرف‌نظر می‌شود و تنها در مورد کانال‌های بزرگ مورد استفاده قرار می‌گیرد. در حالی که در شبکه‌های آبیاری و زهکشی به دلیل تعدد کانال‌های کوچک بخش عمده حجم عملیات خاکی به این کانال‌ها اختصاص دارد.

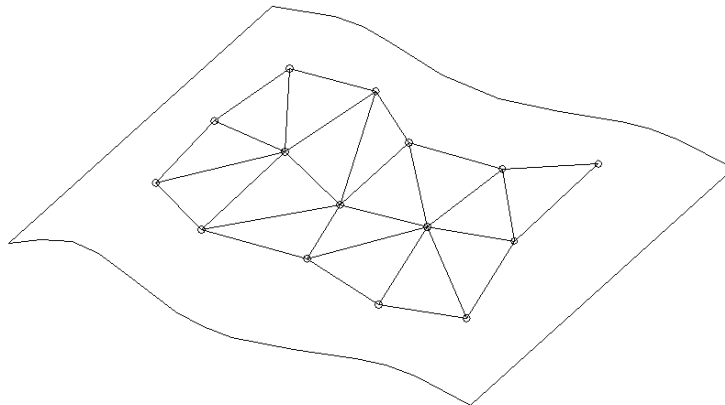
## مواد و روش‌ها

در روش مقطع عرضی فرض بر آن است که تغییرات زمین بین دو مقطع برداشت شده به صورت خطی است.

### صفحه حداقل



شکل ۳- کوچک‌ترین صفحه‌ای که می‌توان در میان نقاط نقشه‌برداری شده برای مدل کردن سطح زمین ایجاد نمود.



شکل ۴- ایجاد صفحات مثلثی، برای مدل کردن سطح زمین طبیعی.

تغییرات سطح زمین در فاصله بین دو مقطع عوارض زمین به صورت کامل مدل نمی‌شوند. مزیت دیگر استفاده از صفحات مثلثی، ایجاد منشورهای سه وجهی در محاسبه حجم است. در واقع در محاسبه حجم یک جسم نامتوازن هر چه که این جسم را به حجم کوچک‌تری تقسیم کنیم، مجموع این حجم به حجم جسم اصلی نزدیک‌تر است. چون سطح زمین طبیعی را به کوچک‌ترین صفحات ممکن تقسیم کرده‌ایم بنابراین منشورهای ایجاد شده از این صفحات کمترین حجم ممکن را دارا خواهند بود. در نتیجه دقت حجم به دست آمده در این روش از روش متداول بیشتر است.

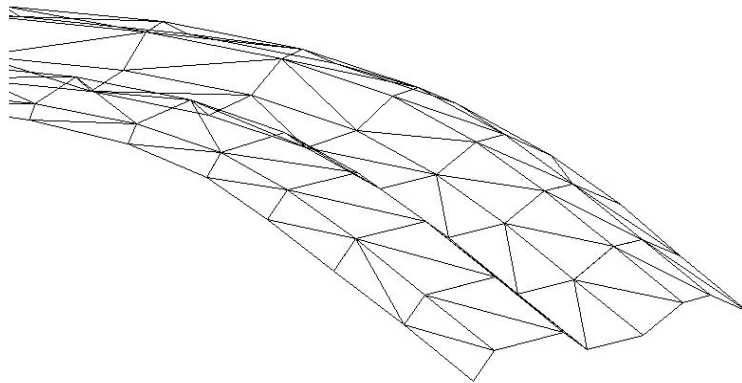
به سطح‌های ایجاد شده در مرحله قبل مدل شبکه مثلثی نامنظم<sup>۱</sup> می‌گویند. این مدل‌ها در ابتدا برای شبیه‌سازی سطح زمین جهت ایجاد نقشه‌های توپوگرافی به کار گرفته شده‌اند و سپس در نرم‌افزارهای کاربردی

باید توجه داشت که در راس هر یک از این صفحات یک نقطه نقشه‌برداری شده وجود دارد. با داشتن رئوس مربوط به این صفحات می‌توان معادله هر صفحه را در فضا به دست آورد. با استفاده از این معادله‌های می‌توان رقوم نقاطی را که در میان نقاط نقشه‌برداری شده نیستند با میان‌یابی محاسبه کرد. مزیت استفاده از این روش آن است که دیگر نیازی به مقطع‌برداری نیست. یعنی این که می‌توان با استفاده از نقاط برداشت شده در نقشه‌برداری تاکومتری، که برای ترسیم نقشه‌های توپوگرافی برداشت می‌شوند رقوم نقاط مورد نیاز برای محاسبه حجم عملیات خاکی را با میان‌یابی به دست آورد. در نتیجه هزینه مقطع‌برداری، که قابل توجه است با این روش حذف می‌شود.

با استفاده از این روش می‌توان سطح زمین را با دقت بیشتر مدل کرد. زیرا که در این روش با استفاده از صفحات مثلثی تمامی عوارض زمین طبیعی مدل می‌شود ولی در روش مقطع عرضی به دلیل فرض خطی بودن

1- Triangular Irregular Network (TIN)

کف، شیب‌های جانبی داخلی و خارجی و رقوم) مدل TIN زمین بعد از انجام عملیات خاکی محاسبه می‌شود. شکل ۵ نمونه‌ای از این مدل را نمایش می‌دهد.



شکل ۵- نمونه‌ای از صفحات مثلثی جهت ایجاد مدل TIN زمین بعد از اجرای کانال.

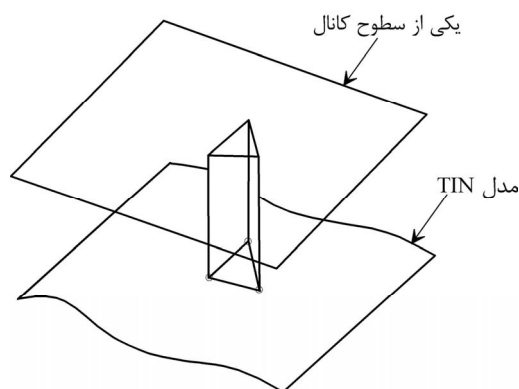
GIS مورد استفاده قرار گرفتند ولی تاکنون از آنها جهت انجام محاسبات حجم عملیات خاکی استفاده نشده است (چویانگین، ۱۹۹۵؛ پاول و هومن، ۱۹۹۸). پس از ایجاد شبکه مثلثی برای زمین طبیعی با استفاده از خط پروژه اولیه ترسیم شده و مشخصات کانال (عرض

۲- وضعیت یکی از رأس‌ها خلاف دو رأس دیگر باشد (یکی در خاکبرداری و دو رأس دیگر در خاکریزی و یا عکس آن). برای حالت اول حجم هر منشور با استفاده از معادله (۱) قابل محاسبه می‌باشد.

$$V = A \times \left( \frac{\sum_{i=1}^{i=3} h_i}{3} \right) \quad (1)$$

در این معادله  $V$  حجم منشور،  $A$  سطح قاعده آن و  $h_i$  میزان ارتفاع خاکبرداری و یا خاکریزی در هر رأس است.

حال باید صفحات مثلثی مدل TIN را بر روی صفحه زمین بعد از اجرای کانال تصویر کرد. در واقع با داشتن معادله صفحات کانال و مختصات رئوس هر مثلث، مختصات نقاط هر رأس را در مدل TIN کانال قرار داده و رقوم آن نقطه بعد از اجرای کانال را به دست می‌آوریم. شکل ۶ نشان‌دهنده نتایج حاصل از این مرحله است. پس از این مرحله منشورهای سه وجهی ایجاد می‌شوند که کافی است حجم آنها را محاسبه کنیم. منشورهای ایجاد شده دارای دو حالت کلی هستند. ۱- تمام رئوس منشور در خاکبرداری و یا در خاکریزی قرار گیرد.



شکل ۶- منشور سه وجهی ایجاد شده برای محاسبه حجم.

$$R = \frac{V_{\text{cut}}}{V_{\text{fill}}} = \frac{f_c(h)}{f_f(h)} = G(h) \quad (5)$$

بنابراین  $R$  نیز تابعی از  $h$  خواهد بود. برای محاسبه نسبت خاکبرداری به خاکریزی معین تابع به صورت زیر به دست می آید.

$$G(h) = R_d \quad (6)$$

که  $R_d$  نسبت خاکبرداری به خاکریزی دلخواه است. معادله ۶ را می توان به صورت زیر نشان داد.

$$K(h) = G(h) - R_d \quad (7)$$

در این معادله  $K(h)$  تابعی است که میزان آن در ارتفاع خاصی که برابر ارتفاع لازم برای رسیدن به میزان نسبت خاکبرداری به خاکریزی مناسب است، برابر صفر خواهد بود.

برای حل این معادله می توان از روش های عددی مختلفی استفاده کرد. در میان روش های عددی روش نیوتن رافسون سریع تر از بقیه به جواب هم گرا می شود. اگرچه این روش سالها پیش در محاسبه معادله ۴ ارائه شده، اما اعمال آن بر یک الگوریتم محاسباتی تاکنون به ثبت نرسیده است. در این مقاله از این روش برای حل عددی معادله (۷) استفاده شده است. روش نمای این مرحله را می توان در شکل (۸) مشاهده کرد.

برای تعیین موقعیت جدید خط پروژه به کمک روش نیوتن رافسون ضروری است که مشتق تابع محاسبه شود. برای محاسبه این مشتق از روش مشتق گیری عددی استفاده شده است. یعنی از تعریف مشتق برای محاسبه آن استفاده شده. به این ترتیب که تابع  $K(h)$  را به ازای موقعیت  $h$  و  $h+\Delta h$  محاسبه و به صورت زیر به کار گرفته شده است.

برای شروع محاسبات لازم است که خط پروژه کانال به صورت اولیه و حدسی ترسیم شود. هرچه این حدس به مقدار واقعی نزدیک تر باشد، تعداد تکرارها برای هم گرا شدن جواب کمتر خواهد بود.

$$K(h) = \lim_{\Delta h \rightarrow 0} \left( \frac{K(h) - K(h + \Delta h)}{\Delta h} \right) \quad (8)$$

برای محاسبه حجم منشور در حالت دوم با فرض خطی بودن تغییرات ارتفاع بین هر دو راس، هر منشور به چند هرم (گوه) مطابق شکل ۷ تقسیم می شود که حجم هر کدام از این هرمها را از معادله زیر محاسبه می کنیم:

$$V = A \times \frac{1}{3} h \quad (2)$$

در این معادله نیز  $V$  حجم هرم،  $A$  مساحت قاعده آن و  $h$  ارتفاع عمود بر قاعده است.

نحوه تقسیم کردن منشور به هرم در حالت دوم در شکل ۶ دیده می شود. در این شکل مثلث  $abc$  یکی از مثلث های شبکه مثلثی زمین طبیعی است. و مثلث  $a'b'c'$  تصویر این مثلث بر روی صفحه کانال است. با محاسبه هر جزء حجم در کل شبکه و جمع کردن آنها با یکدیگر حجم عملیات خاکی کل محاسبه می شود.

## نتایج و بحث

همان گونه که ذکر شد تعدیل حجم عملیات خاکی در طراحی کانالها اهمیت بسیار زیادی دارد. تقریباً هیچ روش و یا رابطه مدونی برای محاسبه مقدار تعدیل ارتفاع کانال غیر از استفاده از روش های آزمون و خطا وجود ندارد.

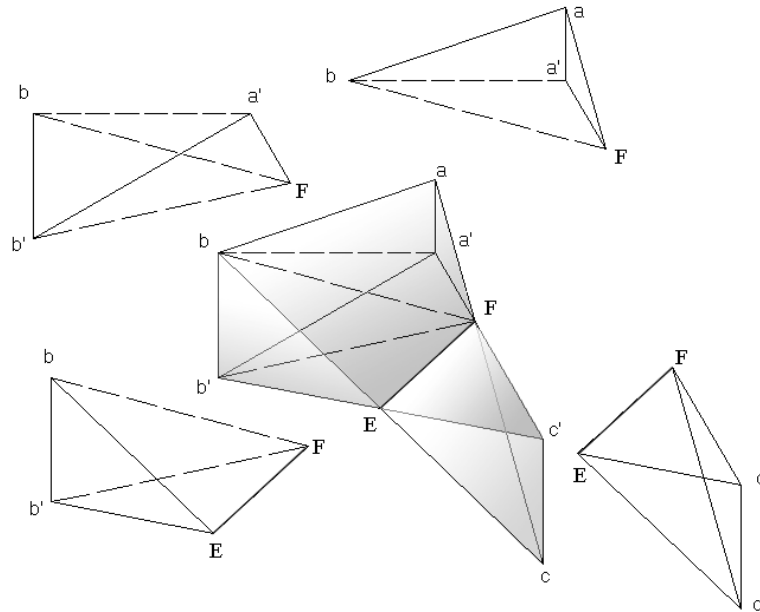
**کاربرد روش نیوتن رافسون در تعدیل حجم:** حجم محاسبه شده بین سطح زمین طبیعی و سطح زمین بعد از اجرای کانال در واقع تابعی از ارتفاع خط پروژه کانال خواهد بود بنابراین می توان این معادله را به صورت زیر بیان کرد.

$$V = f(h) \quad (3)$$

در این معادله  $V$  حجم عملیات خاکی،  $h$  ارتفاع خط پروژه و  $f$  تابعی است که رابطه بین  $h$  و  $V$  را بیان می کند. معادله ۳ به دو تابع تقسیم می شود یک تابع حجم عملیات خاکریزی و دیگری حجم عملیات خاکبرداری را بیان می کند.

$$V = f(h) = \begin{cases} V_{\text{cut}} = f_c(h) \\ V_{\text{fill}} = f_f(h) \end{cases} \quad (4)$$

اگر نسبت حجم خاکبرداری به خاکریزی را  $R$  بنامیم، داریم:



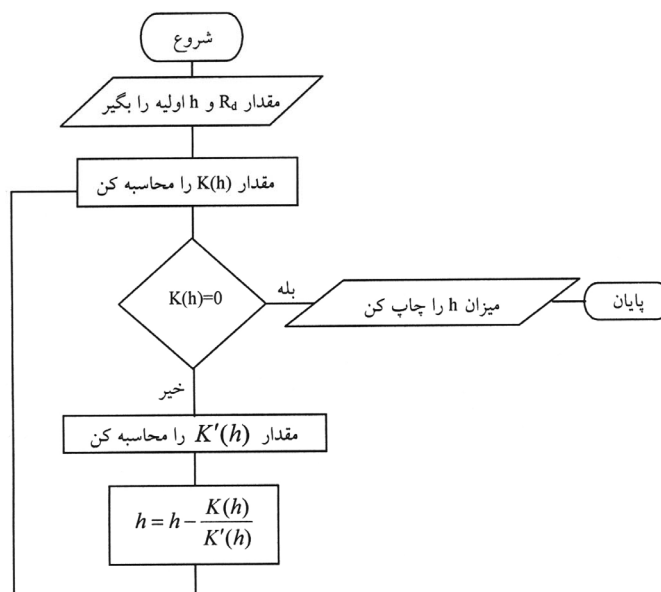
شکل ۷- نحوه تقسیم کردن منشور به چند هرم.

تغییرات، کاملاً مشخص است که می‌توان این نقاط ناپیوسته را به صورت یک تابع پیوسته در نظر گرفت بنابراین برای حل این تابع می‌توان از روش نیوتن رافسون استفاده کرد.

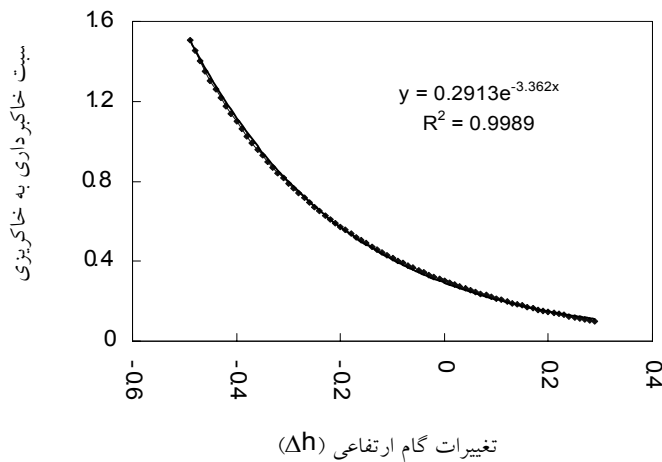
به دلیل استفاده از روش مشتق‌گیری عددی در روش نیوتن رافسون ممکن است آشفتگی‌هایی در حل به وجود آید که می‌توان این آشفتگی‌ها را با استفاده از بررسی رفتار هم‌گرایی روش مذکور مورد مطالعه قرار داد.

با استفاده از این روش و ترکیب آن با روش Composite در محاسبه حجم عملیات خاکی می‌توان ارتفاع تعدیل شده را با دقت مورد نظر به دست آورد.

جهت بررسی درستی استفاده از روش نیوتن رافسون رفتار تابع  $K(h)$  در برابر تغییرات ارتفاع خط پروژه در مثال‌های متعددی ترسیم شده است تمامی این مثال‌ها تقریباً از تابع نمایی تبعیت می‌کنند. نمودار یکی از این توابع در شکل ۹ ترسیم شده است. با مشاهده روند



شکل ۸- روش نمای روش نیوتن رافسون برای محاسبه میزان تعدیل ارتفاع.



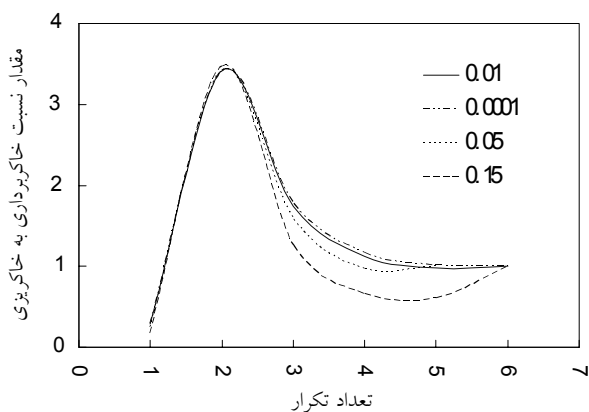
شکل ۹- تغییرات تابع نسبت حجم عملیات خاکی به تغییرات ارتفاع خط پروژه.

بنابراین می‌توان دریافت که روش به انتخاب  $\Delta h$  حساسیت چندانی ندارد.

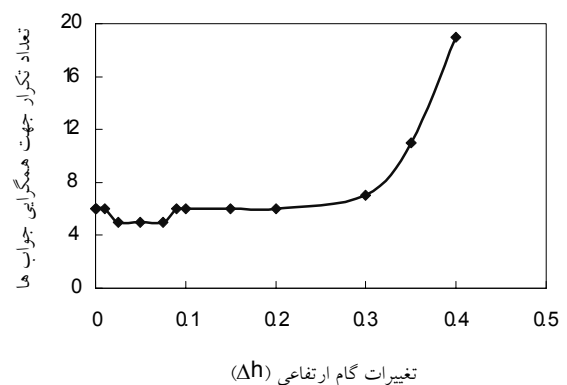
نحوه هم‌گرایی روش به نسبت خاک‌برداری به خاک‌ریزی مورد نظر نیز در شکل ۱۱ نشان داده شده است. در مثال فوق (شکل ۱۱) محاسبه نسبت خاک‌برداری به خاک‌ریزی یک، مورد نظر بوده است.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش مقدار  $\Delta h$  در رفتار هم‌گرایی تابع آشفته‌گی ایجاد می‌شود. این آشفته‌گی در نهایت مستهلک شده و تابع هم‌گرا می‌شود اما این هم‌گرایی با تعداد تکرار بیشتری به دست می‌آید (شکل ۱۲).

مهم‌ترین پارامتری که می‌تواند موجب آشفته‌گی شود. میزان  $\Delta h$  در تعیین مقدار مشتق عددی است. برای بررسی رفتار تابع نسبت به تغییرات  $\Delta h$  در یک مثال تعداد تکرارهای لازم برای هم‌گرایی، رفتار تابع در نزدیک شدن به جواب و با تکرارهای متعدد مورد محاسبه قرار گرفته و نتایج در شکل ۱۰ ارائه شده است. با مشاهده دامنه وسیع تغییرات  $\Delta h$  در این نمودار می‌توان دریافت روش نیوتن رافسون با استفاده از مشتق‌گیری عددی در  $\Delta h$  بزرگ‌تر از  $0/3$  متر به تکرارهای بیشتری جهت هم‌گرایی نیاز دارد از سوی دیگر انتخاب  $\Delta h$  کوچک‌تر از  $0/3$  متر می‌تواند تقریباً در تعداد تکرارها بی‌تاثیر باشد.

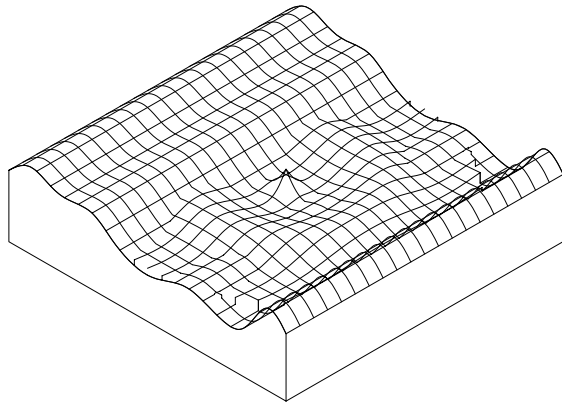


شکل ۱۱- نحوه هم‌گرایی تابع.

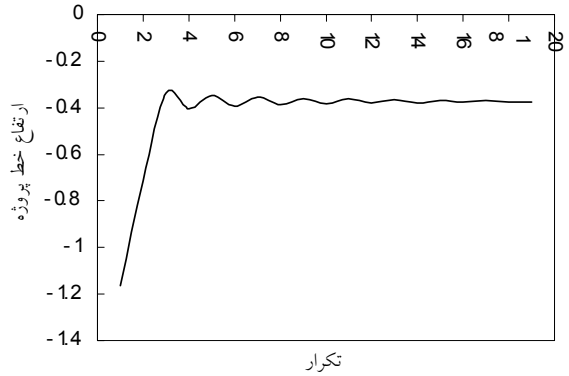


شکل ۱۰- تعداد تکرارهای لازم جهت هم‌گرایی جواب.

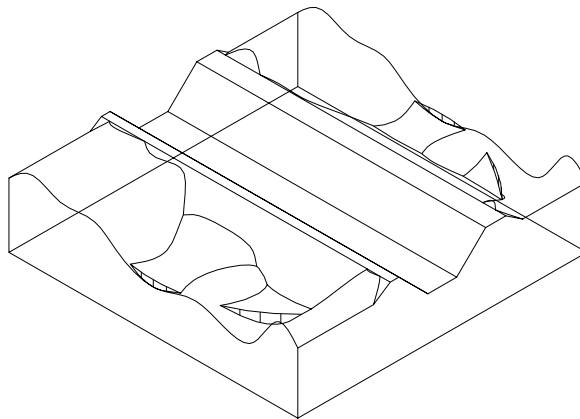




شکل ۱۳- زمین طبیعی مورد استفاده در مثال.



شکل ۱۲- استهلاک اغتشاش در  $\Delta h = 0.4$ .



شکل ۱۴- زمین طبیعی مثال و مقطع پیاده شده کانال بر روی آن.

به گونه‌ای طراحی گردیده است که بخش عمده‌ای از فرم‌های زمین طبیعی (مانند منحنی، سطح شکسته سطح شیب‌دار و سطح مسطح) را شامل شود.

مثال: کانالی با طول ۱۰۰ متر از قطعه زمین شکل ۱۳ عبور می‌کند. این کانال کاملاً افقی بوده و مشخصات هندسی آن به شرح زیر است.

عرض کف ۱۰ متر

عمق کانال ۱۰ متر

شیب جانبی کانال ۱:۱

شیب خاک‌برداری و خاک‌ریزی ۱:۱/۵

جهت محاسبه تحلیلی حجم عملیات خاکی ابتدا مدل سه بعدی زمین و کانال در نرم‌افزار AutoCAD تولید شده سپس حجم مورد محاسبه قرار گرفت.

برای محاسبه حجم عملیات خاکی به روش مقطع عرضی نیز با استفاده از AutoCAD مقاطع عرضی مدل سه بعدی تولید شده سپس مساحت هر مقطع در

**واسنجی روش محاسباتی:** برای ارائه برتری روش پیشنهادی نسبت به روش‌های متداول ضروری است با استفاده از داده‌های واقعی زمین، محاسبات را انجام داده و نتایج را با یکدیگر مقایسه کرد. اما به دلیل وجود خطاهایی نظیر خطای نقشه‌برداری و پیاده‌سازی نقاط، خطای محاسبه حجم عملیات خاکی در عمل و خطای ماشین‌آلات در حین اجرا نمی‌توان میزان دقیق حجم و... را در عمل محاسبه کرد. بنابراین ناگزیر باید مساله را به گونه‌ای طرح کرد که بتوان پارامترهای مورد نیاز را با استفاده از روش‌های ریاضی به صورت تحلیلی محاسبه نمود. بنابراین مثالی ارائه گردیده و با استفاده از انتگرال‌گیری عددی مقادیر واقعی جواب‌های محاسبه شده است.

با توجه به عددی بودن روش پیشنهادی و با در نظر گرفتن خطاهای موجود در پروژه‌های عملی، استفاده از داده‌های آماری غیرممکن است. بنابراین این مثال

خاک برداری و خاکریزی با استفاده از همان نرم افزار مورد محاسبه قرار گرفت و با استفاده از روش محاسبه حجم منشور حجم عملیات خاکی محاسبه شد. نتایج این محاسبات را در جدول ۱ مشاهده می کنید. با استفاده از روش پیشنهادی نیز حجم محاسبه شدند. جهت رفع خطای ناشی از محل انتخاب مقاطع در هر دو حالت حل،

فاصله مقاطع برابر مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حل مثال را در جدول ۲ مشاهده می کنید. با توجه به محاسبات، خطای میانگین روش Composite برابر ۶/۵ درصد و خطای روش مقطع عرضی برابر ۱۹/۸ درصد است. شکل کانال در زمین طبیعی در شکل ۱۴ ارائه شده است.

جدول ۱- نتایج محاسبات حل مثال با استفاده از مقطع عرضی.

مقطع	سطح خاک برداری	سطح خاکریزی	حجم خاک برداری	حجم خاکریزی
۱	۹۸/۹۳۶۵	۷۶/۰۶۳۷		
۲	۴۹/۰۴۱۷	۲۵۳/۹۱۴۳	۳۲۹۹/۷۸	۱۴۷۹/۷۸۲
۳	۲۴/۹۸۲	۱۵۵/۰۶۱۸	۴۰۸۹/۷۶۱	۷۴۰/۲۳۷
۴	۲۸/۹۰۳۹	۱۵۳/۴۶۸۵	۳۰۸۵/۳۰۳	۵۳۸/۸۵۹
۵	۱۶۵/۶۷۷	۱۵/۴۶۲۹	۱۶۸۹/۳۱۴	۱۹۴۵/۸۰۹
۶	۱۲۸/۵۱۶۱	۴۳/۱۲۶۵	۵۸۵/۸۹۴	۲۹۴۱/۹۳۱
	جمع کل		۱۲۷۵۰/۰۵۲	۷۶۴۶/۶۱۸

جدول ۲- نتایج حل مثال به دو روش.

روش	نوع عملیات (مترمکعب)		خطا (درصد)	
	خاک برداری	خاکریزی	خاک برداری	خطا (درصد)
روش پیشنهادی	۱۱۳۰۹/۷	۰/۱۲۱۳۱۳	۰/۰۰۹۶۱	متوسط
حل تحلیلی	۱۱۲۰۲/۰۶	۰/۲۵۷۶۹۴	-۰/۱۳۸۱۹	۰/۰۶۵۴۶۱
مقطع عرضی	۱۲۷۵۰/۰۵	۰/۲۵۷۶۹۴	-۰/۱۳۸۱۹	۰/۱۹۷۹۴۱

درصد خطا با استفاده از رابطه ۹ محاسبه گردیده است.

$$\text{Error (درصد)} = \frac{\text{Ans}_{\text{anl}} - \text{Ans}_{\text{Calc}}}{\text{Ans}_{\text{anl}}} \times 100 \quad (9)$$

که در آن Error: میزان خطا به درصد

Ans<sub>anl</sub>: جواب ناشی از حل تحلیلی و Ans<sub>Calc</sub>: جواب محاسبه شده است.

### نتیجه گیری

خطاهای محاسباتی روش متداول محاسبه حجم عملیات خاکی مورد بررسی قرار گرفته است. برای به حداقل رساندن این خطا از روشی جدید، در محاسبات حجم عملیات خاکی بر مبنای مثلث بندی نامنظم استفاده شده است. در محاسبه ارتفاع خط پروژه کانال نیز، روش نیوتن-رافسون به کار رفته است. نحوه هم گرایسی و رفتار

تابع در این روش مورد بررسی قرار گرفت و برای استفاده از این روش یک بسته نرم افزاری نیز طراحی گردید.

با طراحی مثالی که تمامی حالات سطح زمین را شبیه سازی می نمود، میزان خطای روش پیشنهادی و روش مقطع عرضی مورد مقایسه قرار گرفت و مشخص گردید که خطای محاسبه حجم عملیات خاکی در روش پیشنهادی برابر ۶/۵ درصد و خطای روش مقطع عرضی برابر ۱۹/۷ درصد است که تقریباً سه برابر بیش از روش پیشنهادی است.

### سپاسگزاری

از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه تهران و قطب علمی "ارزیابی و به سازی شبکه های آبیاری و زهکشی" سپاسگزاری می نمایم.

## منابع

1. Afshar, A., and Mariño, M.A. 1992. An optimum land leveling technique for surface irrigation., *International Journal of Engineering*. 31a: 31-42.
2. Anderson, C. 1980. Land shaping In: *Design and Operation of Farm Irrigation System*. American society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Mich., 281-314.
3. Chuangyin, D. 1995. *Triangulations and Simplicial Methods*, Pub. Springer-Verlag, 196p.
4. Easa, S.M. 1989. Direct land grading design of irrigation of irrigation plane surface. *J. Irrig. And Drain. Engrg.*, ASCE. 115: 2.
5. Ebnjalal, R. 1998. *Land leveling: Designing and Calculation*, Chamran Univ. Press, 309p. (In Persian).
6. Kouchakzadeh, S., and Roshani, E., *Land Leveling: a new approach based on Triangular mesh*. 2006. *Iranian Journal of Agriculture Science.*, Tehran Univ. Press, 37: 4. 661-670.
7. Paul, L.G., and Homan, B. 1998. *Delauney Triangulation and Meshing: Application to Finite Elements*, Pub. Kogan Page Ltd. 413p.
8. Raju, V. 1960. Land grading for irrigation. *Trans. American Society of Agricultural Engineers*. 3:10.
9. Scaloppi, E., and Willardson, L. 1986. Practical land grading based on least squares. *J. Irrig. And Drain. Engrg.*, ASCE, 112: 2. 98-109.
10. Shih, S., and Kriz, G. 1971. Symmetrical residuals method for land forming design. *Trans. American Society of Agricultural Engineers*. 1195-1200.
11. Sowell, R., Shih, S., and Kriz, G. 1973. Land forming design by linear programming. *Trans. American Society of Agricultural Engineers*. 296-301.
12. Soil Conservation Service. 1961. Land leveling. In Section 15, *Irrigation, Soil Conservation Service Handbook*, U.S. Dept. of agriculture, Washington, D.C.

## **Determination of canal alignment earth work using Irregular Triangular Mesh**

**E. Roshani<sup>1</sup> and \*S. Kouchakzadeh<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Former M.Sc. student, Dept. of Irrigation and Reclamation Eng. University of Tehran, Iran,

<sup>2</sup>Professor, Dept. of Irrigation and Reclamation Eng. University of Tehran, Iran

---

---

### **Abstract**

The earth work is usually regarded as one of the most expensive activities in engineering practice, yet the methods used in the consulting engineers do not provide the required accuracy and is very time consuming with regard to the computational time. In this paper a new method has been proposed for determining the earth work volume which was based on employing an irregular triangular mesh. The project line level is also optimized by using the method of Newton-Raphson. Comparison between the results of the proposed method and the traditional one for a case having an analytical solution indicates that the proposed method improved the accuracy by a factor of 3. Therefore, applying the proposed method not only increases the accuracy of earth work volume computation, which directly influences the project expenditure, but also determines the optimum project line level based on the earth work volume.

**Keywords:** Canal; Earth work volume computation; Surveying; Triangular mesh; Newton-Raphson