



## توسعه یک روش حل تحلیلی - عددی برای محاسبه منحنی واکنش زمین در تونل‌های با مقاطع غیر دایروی

آنا سلطانی<sup>۱\*</sup>، حمید محمدی<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی معدن، گرایش مکانیک سنگ، موسسه آموزش عالی کرمان، [soltani\\_anna@yahoo.com](mailto:soltani_anna@yahoo.com)  
۲- استادیار گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، [hamid.mohammadi@vru.ac.ir](mailto:hamid.mohammadi@vru.ac.ir)

### چکیده

مطالعه میدان جابجایی‌های اطراف فضاهای زیرزمینی و به طور ویژه تونل‌ها از اهمیت بسیار زیادی در مبحث پایداری برخوردار است که به روش‌های مختلفی امکان پذیر است و در این بین، روش‌های تحلیلی به واسطه کم هزینه بودن، قابل دسترس بودن و دقت مناسب داشتن مورد توجه قرار گرفته‌اند. به دلیل عدم امکان حل تحلیلی معادلات تعادل حاکم بر محیط اطراف تونل‌های با مقاطع غیر دایروی در شرایط رفتار غیر الاستیک، تمامی روش‌های تحلیلی ارائه شده فقط برای تونل‌های با شکل مقطع دایروی هستند و برای محاسبه جابجایی‌ها و منحنی واکنش زمین برای تونل‌های غیر دایروی (مقاطع نعل اسبی کامل و اصلاح شده) بایستی از مدل‌سازی عددی استفاده نمود. با توجه به اینکه امروزه استفاده از تونل‌های با مقاطع غیر دایروی گسترش زیادی در زیرساخت‌های عمرانی و شهری پیدا کرده است، در این مقاله سعی بر این شده است که به بررسی امکان کاربرد یک روش تحلیلی یا هیبریدی برای محاسبه منحنی واکنش زمین مقاطع غیر دایروی پرداخته شود. به این منظور، جابجایی‌های سه مقطع دایروی، نعل اسبی کامل و اصلاح شده در پنج عمق ۴۰، ۸۰، ۱۲۰، ۱۶۰ و ۲۰۰ متر و با استفاده از مدل‌سازی عددی (ساخت بیش از ۱۷۰ مدل عددی با استفاده از نرم افزار  $FLAC^{2D}$ ) مورد بررسی قرار گرفتند و برای هر مقطع و هر عمق به طور جداگانه منحنی واکنش زمین در سقف و دیواره رسم شد. در ادامه با استفاده از نتایج مدل‌سازی عددی و با کاربرد روابط حل تحلیلی دانکن فاما، روابط جدیدی به صورت هیبریدی (تحلیلی- عددی) برای محاسبه جابجایی‌ها و منحنی واکنش زمین برای تونل‌های با مقاطع نعل اسبی کامل و اصلاح شده توسعه داده شد. در نهایت، یک تحلیل حساسیت برای بررسی نحوه ارتباط تغییرات جابجایی‌ها نسبت به عمق برای تمامی شکل مقاطع انجام و مشخص شد که ارتباط آنها غیر خطی است.

**واژه‌های کلیدی:** تونل، مقطع غیر دایروی، منحنی واکنش زمین، روش تحلیلی، روش عددی

### ۱- مقدمه

تعیین جابجایی‌های ایجاد شده در زمین در اثر حفاری تونل، یکی از مهم‌ترین مسائل مربوط به تونل‌سازی است. بزرگی و نحوه توزیع جابجایی‌ها، اطلاعات مفیدی در مورد خواص مهندسی زمین، پایداری جبهه کار، تنش‌ها و تغییر شکل‌های اطراف فضای زیرزمینی و دیگر مسائل ارائه می‌دهند [۱]. برای بررسی پایداری فضاهای زیرزمینی از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود و یکی از این روش‌ها، روش همگرایی- محصور شدگی است [۲]. این روش در سال‌های ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰ توسعه داده شده است [۳]. این روش بر این اصل استوار است که یک تونل با کنترل کردن جابجایی‌های آن بعد از نصب نگهداری در نزدیکی جبهه کار تونل، پایدار می‌شود. این روش شامل سه المان است که عبارتند از: پروفیل تغییر شکل طولی، منحنی واکنش زمین و منحنی مشخصه نگهداری (شکل ۱). پروفیل تغییر شکل طولی، جابجایی‌های شعاعی مقاطع عرضی تونل را در جهت طولی از