تحليل پويا و غير خطي پي تحت بار ماشينهاي ارتعاشي

محمد رضا كاخی
دانشيار گروه مهندسی عمران, دانشكده مهندسی, دانشگاه فردوسی مشهد

چكيده

استفاده از ماشين آلات سنگين دركارخانجات به طور روز افزون گسترش مييابد و طراحي پی آنها نياز به تخصص ويژه مهندسان خاك و پي دارد در پژوهش حاضر, روشهاي مختلف تحليل پي تحت بار ماشين آلات مورد مطالعه قرار گرفته است. روشهاي موجود طراحي, رفتار خاك زير پي را كشسان فرض مينمايند. همچنين اكثر شيوههاي مزبور، در محاسبات دامنه ارتعاش، از تاثير شكل پي صرفنظر ميكنند. محدوديت ديگري كه اين روشها دارند, فرض همگن بودن خاك زير پي است كه چنين فرضي با توجه به شرايط ساخت پي و اصلاح خاك زير آن، چندان با واقعيت سازگار نيست. در اين نوشتار، براي تحليل واقعيتر پي ماشين آلات، از نرمافزار ANSYS5.4 استفاده شده و به كمك اين نرمافزار, مدلسازي جديدي انجام گرديد كه بـه كمك آن مـيتـوان پي و خاك اطراف آنرا با هم در نظر گرفت و دامنه ارتعاش پي تحت بار ارتعاشي ماشين آلات كه همان نشست خاك است، را بـه دست آورد. همچنين با روش تحليل غيرخطي، رفتار مومساني خاك تحت بار ارتعاشي مورد بررسي قرار گرفت. كه براساس آن، ميتوان نشست پي روي خاكهاي لايهاي و پيهاي مدفون در خاك را به دست آورد و اثر شكل پي بر رفتار آن، تحت بار ارتعاشي مورد بررسي قرار داد. در مقاله حاضر، بعضي نتايج به دست آمده از مدل مزبور با روشهاي سنتي مقايسه گرديده است.

كلمات كليدی: پي, بارگذاری ارتعاشی, تحليل پويا و غير خطی.

Nonlinear Analysis for Foundation under Dynamic Loads

M. R. Kakhi
Faculty of civil Eng., Ferdowsi University of Mashhad

Abstract

Nowadays, usage of heavy industrial machines has been increased rapidly and special knowledge for geo-technical engineers is required for convenient design of machine foundations. In this paper conventional methods for analysis of machine foundations have been studied. All of these approaches assume that soil behavior is elastic and homogeneous. In addition most of these methods neglect shape of foundation. In this paper, ANSYS5.4 is used for better analysis of machine foundation. Using this powerful software, a new model is proposed that can consider both soil and foundation behavior together. Applying this model, determination of foundation displacement is possible. Also, foundation settlement located on the multi-layered soils, embedded foundation and effect of foundation shape on the behavior of foundation under dynamic loads can be studied. Finally results of proposed model have been compared with that of conventional method.

Key words: Foundation, Dynamic load, Dynamic and nonlinear analysis.

۱- مقدمه

تا اوايل قرن بيستم، طراحي پي ماشـينهاي ارتعاشـي، بـدون محاسبه دامنه نوسانات انجام ميگرديد. شايد بتوان گفـت، اولـين بررسي جامع اثرات ارتعاش ماشين آلات بر پاسخ پـي مشخـصات خـاك بـين سـالهاي ۱۹۲۸ و ۱۹۳۶ مـيلادي، توسـط گـروه تحقيقاتي دگبو انجام شـد [۱]. در چنـد دهـه اخيـر، بررسـيهاي زيادي درباره تحليل و طراحي پي تحـت بـار پويـا انجـام گرفتـه است. به طوريكـه در بعـضي از كـشورها آيـين نـامههـايي بـراي طراحي پي ماشين آلات تدوين گرديـده اسـت. بـه طـور عمـده، ماشين آلات به سه دسته ماشينهاي رفت و برگشتي، ضـربهاي و دوراني تقسيم ميشوند. براي ماشينهاي رفت و برگشتي از پيهاي بلوكي، براي ماشينهاي ضربهاي از پيهاي بلوكي سـنگين و بـراي ماشينهاي دوراني از پيهاي پدستال استفاده ميشود. طراحي پيها بايد با توجه به معيارهاي ايستا و پويا انجام گيرد. معيـار طراحـي پـي در برابـر بـار ايـستا بـدين صـورت اسـت كـه پـي در برابـر گسيختگي برشي ايمن باشد و همچنين نشست پي، از حد مجـاز بيشتر نشود. همچنين، براي طراحي پي در برابر بارهاي پويا، بايد توجه داشت كه دامنه ارتعاش پي، از مقدار مجاز آن، كه كارخانـه سازنده آن را مشخص ميكند, بيشتر نشود. از سوي ديگر، بـسامد بارگذاري پي نيز بايد به اندازه كافي از بـسامد طبيعـي مجموعـه خاك و پي و ماشين دور باشد تا پديده تشديد رخ ندهد.

روشهايي كه براي تحليل پي ماشين آلات مورد استفاده قـرار ميگيـرد، داراي فرضـيات سـاده كننـدهاي مـيباشـند و در همـه حالات نميتوان از پاسخ به دست آمده از آنهـا اسـتفاده نمـود. از جمله اين فرضيات، كشسان بودن رفتار خاك و همگن بـودن آن است. امكان دارد در بعضي از بسامدهاي بارگذاري، خاك زير پـي به حالت مومسان برسد و يا اينكه پي بر روي خـاك دو يـا چنـد لايه قرار بگيرد. همچنين، در اغلب روشهاي سنتي، براي پـيهـاي مختلف از سطح معادل دايرهاي استفاده ميكنند كه ممكن اسـت جوابهاي درستي ندهد. براي پاسـخ بـه اشـكالات فـوق و تحليـل واقعيتر پي تحت بار ارتعاشي ماشين آلات، خاك و پي به كمـك نــرمافزار ANSYS5.4 و بــا اســتفاده از اجــزاي SOLID45 و CONTACT49 مدل شدهاند. در ايـن پـژوهش، الگـوي رفتـاري كشـسان - مومـسان كامـل و معيـار تـسليم در اگـر- پراگـر مورداستفاده قرار گرفت و پاسخهاي به دست آمده از اين مدل با روشـهاي ديـگر مقايسـه شـد. بايد افزود، براي تماس خاك و پي جزء CONTACT به كار گرفته شده است.

۲- روشهاي تحليل پي ماشينهاي ارتعاشي

تا اوايل قرن بيستم، طراحي پـي ماشـين آلات، بـدون هـيچ محاسبهاي از دامنه نوسانات انجام ميگرفت. بـراي طراحـي پـي، وزن آن را چند برابر وزن ماشين قرار گرفته روي آن ميگرفتند كه اين عمل روش صحيحي نبوده، زيرا بسياري از عاملهاي نوسان از قبيل نوع تحريك، طبيعت خاك زير پي و غيره را ناديده ميگيرد. آن چه در اين بخش ارائه ميشود، تاريخچه تكامل روشهاي تحليل پوياي پـي ماشـين آلات اسـت. روشـهاي تحليـل در دو قـسمت جداگانه مـورد بررسـي قـرار مـيگيرنـد. قـسمت اول مربـوط بـه روشهايي است كه اثر انتشار امواج را در خاك زير پي، بـه عنـوان يك لايه كشسان، در نظر نميگيرند. گرچـه ايـن روشـها درحـال حاضر از اهميت چنداني برخوردار نيستند، امـا بـه دليـل ايـنكـه آئين نامههاي بعضي از كشورها، از قبيل هنـد و روسـيه بـر ايـن اصول پايهگذاري شدهاند، در اين بخش به آنها اشاره مـيشود. در قسمت دوم به روشهايي پرداختـه مـيشود كــه بـر پايـه تئـوري انتشار امواج در نيم فضاي كشسان هستند.

۲-۱- روشهاي ارائه شده بدون در نظر گرفتن اثـر انتـشار امواج

اولين بررسي جامع اثرات ارتعاش ماشين آلات بر پاسخ پي و مشخصات خاك در بين سالهاي ۱۹۲۸ ميلادي و ۱۹۳۶ ميلادي توسط گروه تحقيقاتي دگبو انجام شد. در اين تحقيقات پـيهـا در حالتهاي ارتعاشي قائم و پيچشي مورد مطالعه قرار گرفتند. لارنـز در سال ۱۹۳۴ ميلادي، با ارائه مقالهاي اثر وزن نوسانگر، مساحت صـفحه زيـر نوسـانگر و نيـروي تحريـك را بـر بـسامد تـشديد، موردبررسي قرار داد. از آزمايشهاي دگبو و بررسيهاي بعـد از آن، انديشهاي شكل گرفت كه جرمي از خاك به همراه پي، به نوسان در ميآيد (جرم هم فاز، جرمي از خاك است كه با پي به ارتعـاش در ميآيد). پس از آن كراكت و هاموند و پس از آنها رائو از مفهوم حباب تنش در زير پي، براي به دست آوردن مقدار جرم هم فـاز، m_s ، استفاده كردند. براي بهبود بخـشيدن بـه روشـهاي ارزيـابي بـسامد تـشديد پـيهـاي ماشـين آلات روي خاكهـاي مختلـف، چبوتاريف و چبوتاريف عبارتي را به عنوان بسامد طبيعي كـاهش يافته سيستم، به دست آوردنـد [۱]. روش ديگـر، بـراي تخمـين تغيير شكل پي بارگذاري شده روي خاك، جايگزين كردن خـاك

با يك مجموعه از فنرهاي كشسان است كه يك نيروي واكنـشي معادل در برابر تغيير مكان به وجود آمده، داشته باشد. اين روش توسط هاياشي, ترزاقي و هتني مورد مطالعه قرار گرفـت. رزاقـي، بررسيهـاي جـامعي بـر روي روشـهاي محاسـبه ضـرايب معـادل واكنش كشسان خاك زير پـي، انجـام داد. پـس از آن باركـان از مفهوم واكنش كشسان خاك زير پي به طور وسيعي استفاده كرد و ثابت فنر را براي حالتهاي مختلف ارتعاشي، به دست آورد [۲].

۲-۲- روشهاي ارائه شده با در نظر گرفتن اثر انشار امواج

در سال ۱۹۰۴ ميلادي لمب طي مقالهاي اثر انتشار امواج در نيم فضاي كشسان را مورد بررسـي قـرار داد. ايـن مقالـه اسـاس راه‌حلهاي نـظري فـراهم شـده از فرض قرارگيري يـك نوسـانگر بــر روي سـطح همگــن، همســان و كشـسان و يـك تـوده نـيم بينهايت شد. لمب يك نيروي نوساني را در يك نقطه روي سطح و درون نيم فضا اعمال كرد و پاسخ مربوط به آن را بررسي كـرد. بعد از آن ريسنر تصميم گرفت كه يك نظريه براي ارزيابي پاسـخ پوياي ارتعاش پي كه تحت تاثير خواص پوياي خـاك قـرار دارد، فراهم نمايد. وي تنش زير پي را يكنواخت در نظر گرفت [۲و۳]. كويين لن اثرات تنش غير يكنواخت در زير يك پي دايرهاي واقع بر نيم فضاي كشسان را مورد بررسي قرار داد. كويين لـن توزيـع تنش در زير پي را به سـه صـورت سـهموي، يكنواخـت و توزيـع صلب در نظر گرفت, اما فقط در حالت توزيـع صـلب راه حلـي را ارائه داد. سانگ در همان سال معادلاتي را براي حالتهاي مختلف توزيع تنش در محاسبه تغيير مكان زير پي در همه حالتهـا ارائـه داد. سپس، هسي راه حل ريسنر را اصلاح كـرد. هـدف او از ايـن اصلاح، در نظر گـرفتن اثـرات ميرايـي هندسـي بـود. پـس از آن ليسمر و ريچارت يك آنالوگ ساده جرم-فنـر- ميراگـر پيـشنهاد كردند كه به آنالوگ ليسمر، معروف اسـت[۲و۳]. در سـال ۱۹۶۷ ميلادي ريچارت و وايتمن نشان دادند كه روش ليسمر را مي‌توان براي حالتهاي ارتعاشي مختلف به كار برد. براي اين كـار بايـد در سيستم جرم - فنر- ميراگر عاملهـاي مـستقل از بـسامد را بـراي حالتهاي ارتعاشي مختلف، درست انتخاب كـرد. گزنـاس و دبـري مفهوم پارامترهاي متمركزجرم- فنر-ميراكننده را با ديد ديگـري مورد بررسـي قرار دادنـد و سـختي را بـه صـورت عـدد مخـتلط تعريف نمودنـد. همچنـين اثــرات دفـن شـدگي پـي بـر ميـزان سختـي و ميـرايي در حالتهاي ارتعاشي مختلف مورد بررسي قرار دادند [۵، ۶، ۷، ۸، ۹ و ۱۰].

۳- مدل ارائه شده

آنچه در اين بخش مـيآيـد، ارائـه يـك مـدل پيـشنهادي بـا استفاده از نرمافزار ANSYS5.4 است. بـا اسـتفاده از ايـن مـدل، ميتوان ميزان نشست پـيهـاي بـا شـكلهاي مختلـف را در حالـت بارگذاري ايستا و پويا تعيـين نمـود. همچنـين تحليـل پـي روي خاك چند لايه و شـناخت رفتـار مومـساني خـاك بـا ايـن روش امكـانپـذير اسـت. در بخـشهاي زيـرين، پـس از تـشريح نحـوه مدلسـازي به كمك نـرمافـزار فـوق، بررسيهاي انجـام شـده روي مقدار نشست و ظرفيت باربري پيها با شـكلهاي مختلـف، كـه بـر روي خاكهاي چسبنده و دانهاي، در حالت بارگذاري ايستا و پويـا قرار ميگيرند، مطالعه شده است.

۳-۱- مـدلسازي پــي وخــاك بــا اســتفاده از نــرمافزار ANSYS5.4

در اين قسمت، به طور مختصر بـه تـشريح نحـوه مـدلسازي پرداخته ميشود. همچنين، در رابطه با معيار تسليم و نوع تحليل، كه در اين مدل مورد استفاده قـرار گرفتـه اسـت، مطـالبي ذكـر خواهد گرديد. خاطر نشان ميشود، مراحل مدلسازي و تحليـل را ميتوان به گامهاي زير تقسيم نمود:

در گام اول نوع اجزاي مورد اسـتفاده در سـاخت مـدل و خـواص مصالح معرفي ميگردند. سپس هندسه مدل ايجاد ميگـردد. پـس از مدلسازي هندسي، شبكه اجزاي محدود ساخته ميشود. در گام بعد، شرايط تكيهگاهي مشخص و سپس بارگذاري موردنظـر، بـر روي مدل اعمال ميگردد. در نهايت با مشخص كردن نوع تحليـل و روش حل آن ميتوان اندازه دامنه نوسان پـي، تحـت بارگـذاري ايستا و پويا را به دست آورد.

۳-۲- تعيين نوع جزء

براي تعيين نوع جـزء بايـد بـه درجـات آزادي جـسم توجـه داشت. از آنجـاييكـه پـي و خـاك زيـر آن، داراي درجـات آزادي انتقالي در جهت x، y و z هستند، بنـابراين جـزء مناسـب بـراي آنها در حالت دو بعدي و سه بعدي، به ترتيب جزء PLANE82 و جـزء SOLID45 ميبـاشد. بايد توجه داشت، كه بتن و خاك، بـه صورت دو جسم يكپارچه عمل نميكنند، بلكه در مرز تماس بين دو جسم امكان لغزش وجود دارد. با توجه به مطالب مذكور، براي ناحيه تماس بين پي و خاك در حالت سه بعدي، از جـز تماسـي

CONTAC49 و در حالت دو بعدي از جز تماسـي CONTAC48 مورد استفاده قرار گرفت. بايد افزود، از خصوصيات اجزاي تماسي آن است كه فقط قادر به تحمل نيروي فشاري هستند و در برابـر نيروي كششي هيچ مقاومتي از خود نشان نميدهند.

جزء تماسي CONTAC49، كـه در حالـت سـه بعـدي مـورد استفاده قرار ميگيرد يـك جـزء پـنج گرهـي اسـت. ايـن جـزء را ميتوان براي تماس دو جسم صلب يا انعطافپذير، در تحليل ايستا و پويا به كار گرفت. براي توليد جزء تماسي، دو سطح مجـاور بـه عنوان سطح هدف و يا به عنـوان سـطح تمـاس معرفـي مـيشود. سطح هدف با گرههاي هدف, x, y و z معرفي مـيشوند و سـطح تماس به وسيله گره تماس M مشخص ميگـردد. بـه طـور كلـي ميتوان گفت كه تماس زماني رخ ميدهد كه گره تمـاس (M) در سطح هدف (L,K,J,I) نفوذ كند. در طي حركت گـره تمـاس بـر روي سطح هدف، در اثر اصطكاك نيروي مماسي به وجود ميآيد. يادآور ميشود، اجزاء تماسي سه الگوي اصطكاكي زير را ميتواننـد در نظر بگيرند:

الف) الگوي بدون اصطكاك

ب) الگوي اصطكاك كشسان - كولمب

ج) الگوي اصطكاك صلب كولمب

۳-۳- تعيين خواص مصالح

پس از تعيين نوع جزءهاي مورد اسـتفاده در مـدل، خـواص مصالح نيز مشخص ميشوند. خواصي كه در اين مدل معرفي آنهـا لازم ميباشند، ضريب كشساني مصالح E, چگالي جرمي ρ, نسبت پواسن ν و ميرايي مـصالح C هـستند. همچنـين, بـراي اجــزاي تماسـي لازم است ضريــب اصـطكاک بيــن خــاک و پـي, بــه عنوان خواص مصالح آنها معرفي شوند. در ايـن قـسمت, خـواص مومساني نيز معرفي ميشوند. در اين مدل معيار تسليمي كه براي خاک در نظر گرفته ميشود, معيار دراكر-پراگر است. در نرم افزار ANSYS5.4, معيار تسليم دراكـر-پراگـر را مـي تـوان بـا قـانون جريان وابسته و يا غير وابسته به كار بـرد. از طرفـي, ايـن معيـار خواص مصالح را كشسان-مومسان كامل در نظر مـيگيـرد يـا بـه عبارت ديگر, سطح تسليم با پيشروندگي تسليم تغييـر نمـيكنـد. اين بدان معنا است كه سطح تسليم بدون سخت شوندگي اسـت. در نرم افزار ANSYS5.4, تنش معادل σ_e براي تـسليم دراكـر-پراگر, به صورت زير در نظر گرفته مي شود:

$$\sigma_e = F(\{\sigma\}) \qquad (۱)$$

$$\sigma_e = 3\beta\sigma_m + \left[\frac{1}{2}\{S\}^T[M]\{S\}\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (۲)$$

كه σ_m تنش هيدرواسـتاتيكي اسـت و مقـدار آن از رابطـه زيـر بدست آيد:

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \qquad (۳)$$

همچنين $\{S\}$ بردار تنش انحرافي است كه به شرح زيـر نوشـته ميشود:

$$\{S\} = \{\sigma\} - \sigma_m[1 \quad 1 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \qquad (۴)$$

معيار دراكر- پراگر یک معيار اصلاح شده از فون- ميسز است که اثرات تنش هيدرواستاتيکي را در نظر ميگيرد. واضح است که هر چقدر که تنش هيدرواستاتيکي بيشتر باشد, مقاومت گسيختگي بيشتر ميشود. همچنين β, ثابت مصالح است که از رابطه زير بـه دست ميآيد:

$$\beta = \frac{2\sin}{\sqrt{3}(3-\sin\phi)} \qquad (۵)$$

در رابطه اخير ϕ, زاويه اصطکاک داخلي خاک است. عامل تسليم مصالح, σ_y به صورت زير تعريف ميشود:

$$\sigma_y = \frac{6c\cos\phi}{\sqrt{3}(3-\sin\phi)} \qquad (۶)$$

در اينجا c مقدار چسبندگی خاک اسـت. بـدين ترتيـب, معادلـه سطح تسليم را میتوان به صورت زير نوشت:

$$F = 3\beta\sigma_m + \left[\frac{1}{2}\{S\}^T[M]\{S\}\right]^{\frac{1}{2}} - \sigma_y \qquad (۷)$$

معيار دراکر- پراگر محاط در شش ضـلعي سـطح تـسليم مـوهر-کولمب است. همچنين $\left[\frac{\delta F}{\delta\sigma}\right]$ به صورت زير محاسبه ميشود:

$$\left[\frac{\delta F}{\delta \sigma}\right] = \beta\left[1 \quad 1 \quad 1 \quad \ldots\right]^T + \frac{1}{\frac{1}{2}\left[\{S\}^T\{M\}\{S\}\right]^{1/2}}\{S\} \qquad (۸)$$

اگر σ_e کمتر از σ_y باشد, مصالح در محدوده کشسان هستند و ميتوان از روابط تنش-کرنش کشسان استفاده کـرد. هنگـاميکـه تنش معادل مساوي با عامل تسليم مصالح σ_y شـود, در مـصالح کرنش مومساني رخ ميدهد. توجه شود که تنش معادل نميتوانـد از سطح تسليم تجاوز کند و در اين حالت تنش به سـطح تـسليم برگردانده ميشود. همچنين بايـد دانـست, قـانون جريـان جهـت کرنـش مومسانـي را نشان ميدهد. کرنش مومساني از رابطه زيـر به دست ميآيد:

$$\left\{d\varepsilon^{pl}\right\} = \lambda\left\{\frac{\delta Q}{\lambda \sigma}\right\} \qquad (۹)$$

λ ضريب مومساني است و $d\varepsilon^{pl}$ مقدار نمو کـرنش مومـساني را نشان ميدهد. همچنين Q تابعي از تنش است کـه بـه عنـوان پتانسيل کرنش خميري ناميده ميشود. اگر تابع Q با تابع تـسليم منطبق شود قانون جريان متعامـد و يـا وابـسته اسـت و کـرنش مومساني در جهت عمود بر سطح تسليم رخ ميدهد. بايد دانـست کـه β بـا اسـتفاده از ϕ_f (ثابـت اتـساع) ارزيـابي مـي شـود. هنگاميکه $\phi_f = \phi$ باشد, قانون جريان, وابسته و بردار کـرنش مومساني عمود بر سطح تسليم ميشود. همچنين همراه با کـرنش مومساني, افزايش حجم وجود خواهد داشت. اگر ϕ_f کمتر از ϕ باشد, افزايش حجم کمي رخ خواهـد داد و در شـرايطي کـه ϕ_f صفر باشد, هيچگونه افزايش حجمي به وجود نخواهد آمد.

کرنش خميري معادل ε^{pl} از معادله زير به دست ميآيد:

$$\varepsilon_n^{pl} = \varepsilon_{n-1}^{pl} - \Delta\varepsilon^{pl} \qquad (۱۰)$$

همچنين تنش معادل σ_e^{pl} , از رابطه زير محاسبه میشود:

$$\sigma_e^{pl} = \sqrt{3}\left(\sigma_y - 3\beta\sigma_m\right) \qquad (۱۱)$$

۳-۴- ساخت هندسه مدل و شبکه بندي آن

از آنجاييکه در اين تحقيق بارهاي وارده بر پيها, بار ارتعاشـي قائم در نظر گرفته شدهاند, بنابراين براي شـکلهاي مختلـف پـي (مربعـي, مـستطيلي و نـواري) در دو راسـتا از خاصـيت تقـارن استفاده شده است. اما اولين پرسشي که مطرح ميشود آن اسـت که چه محدودهاي از خـاک اطـراف پـي بـراي مـدل مـوردنظـر انتخاب شود. براي پاسخ به اين پرسش, مدلهاي زيـادي بـا ابعـاد مختلف خاک اطراف پي در نظر گرفته شـد کـه پـس از بررسـي تأثيرات نشست نتايج زير به دست آمد:

الف) عمق خاک در زير پي به اندازه سه برابر عرض پـي در نظـر گرفته شود.

ب) سه برابر عرض پي خاک اطراف در محاسبات لحاظ شود.

۴- تحليل پويا

در اين مقاله اثرات يک بار سينوسي بر يک پي مورد بررسـي قرار گرفـت. از آنجـاييکـه نـرمافزار ANSYS5.4 قابليـت تحليـل هارمونيک را در حالـت مومـساني نـدارد, بـه ناچـار از بارگـذاري معادل بار سينوسي به صورت گـذرا و تاريخچـه زمـاني اسـتفاده شده است. تحليل پويا و گذرا, يک فن براي انـدازهگيـري پاسـخ پوياي سازه, تحت بار وابسته به زمان به کار ميرود. از اين تحليل ميتـوان تغييـر مکانهـا, کرنـشها تنـشها و نيروهـا را در زمانهـاي مختلف به دست آورد. معادله حرکت براساس تحليل پويا و گـذرا را ميتوان به صورت زير نوشت:

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [k]\{U\} = \{f(t)\} \qquad (۱۲)$$

[M]: مـاتريس جرمـي, [C]: مـاتريس ميرايـي, [k]: مـاتريس سختي, $\{\ddot{U}\}$: بردار شتاب گرهـي, $\{\dot{U}\}$: بـردار سـرعت گرهـي, {U}: بردار تغيير مکان گرهي و {F(t)}: بردار بار مي باشد [۳]. نرمافزار ANSYS5.4 براي حل اين معادلات از روش انتگرالگيري نيومارک, در هر زمان استفاده ميکنـد. ايـن روش از توزيـع روش تفاضلات محدود در فواصـل زمـاني اسـتفاده مـيکنـد کـه در آن فرضيات زير در نظر گرفته ميشود:

$$\{\dot{U}_{n+1}\} = \{\dot{U}_n\} + (1-\delta)\times\{\ddot{U}_n\} + \delta\{\ddot{U}_{n+1}\}\Delta t \quad (۱۳)$$

$$\{U_{n+1}\} = \{U_n\} + \{\dot{U}_n\}\Delta t + (\tfrac{1}{2}-\alpha)\{\ddot{U}_n\} + \alpha\{\ddot{U}_n\} + \alpha\{\ddot{U}_{n+1}\}\Delta t^2 \quad (۱۴)$$

در رابطـه فـوق α و δ, عاملهـاي انـدازهگيـري نيومـارک و $\Delta t = t_{n+1} - t_n$ میباشد.

هدف اصلي از حل معادلـه فوق محاسبه تغييـر مکـان $\{U_{n+1}\}$ میباشد. براي اينکار معادلـــه (۱۲) را مـيتـوان بـه صـورت زيـر نوشت:

$$\{U_{n+1}\} = \{U_n\} + \{\dot{U}_n\}\Delta t + (\tfrac{1}{2}-\alpha)\{\ddot{U}_n\} + \alpha\{\ddot{U}_n\} + \alpha\{\ddot{U}_{n+1}\}\Delta t^2 \quad (۱۵)$$

$$\{\ddot{U}_{n+1}\} = a_0(\{U_{n+1}\} - \{U_n\}) - a_2\{U_n\} - a_3\{\ddot{U}_n\} \quad (۱۶)$$

$$\{\dot{U}_{n+1}\} = \{\dot{U}_n\} - a_6\{\ddot{U}_n\} - a_7\{\ddot{U}_{n+1}\} \quad (۱۷)$$

در معادلات بالا ضرايب a با زيرنويسهاي مختلف بـه صـورت زيـر تعريف میشوند:

$$a_0 = \frac{1}{\alpha\Delta t^3}, a_1 = \frac{\delta}{\alpha\Delta t}, a_2 = \frac{1}{\alpha\Delta t} - 1, \quad a_3 = \frac{1}{2\alpha} - 1 \quad (۱۸)$$

$$a_4 = \frac{\delta}{\alpha} - 1, a_5 = \frac{\Delta t}{2}\left(\frac{\delta}{\alpha} - 2\right), \quad a_6 = \Delta t(1-\delta), a_7 = \delta\Delta t \quad (۱۹)$$

که ميتـوان عبـارت $\{\ddot{U}_{n+1}\}$ از معادلـه (۱۶) را در معادلـه (۱۷) جايگزين کرد. بـدين صـورت مقـادير $\{\dot{U}_{n+1}\}$ و $\{\ddot{U}_{n+1}\}$ فقـط براساس مقادير نامعلوم $\{U_{n+1}\}$ خواهد بود و با قراردادن معادله (۱۵) معادله زير به دست ميآيد:

$$\{a.[M] + a_1[C] + [K]\} = [F] + [M](a.\{U_n\} + a_2\{\dot{U}_n\} + a_3\{\ddot{U}_n\} \quad (۲۰)$$

$$[C] = (a_1\{U_n\} + a_4\{\dot{U}_n\} + a_5\{\ddot{U}_n\}) \quad (۲۱)$$

پس از محاسبه $\{U_{n+1}\}$, مقادير $\{\dot{U}_{n+1}\}$ و $\{\ddot{U}_{n+1}\}$ را ميتـوان از معادلات (۱۶) و (۱۷) محاسبه نمود. طبـق تئـوري زينکـويچ, حل معادله (۱۵) به کمک معادلات نيومارک تحـت شـرايط زيـر پايدار است[۳]:

$$\alpha > \left(\tfrac{1}{4}\right)(1+\delta)^2 \qquad \delta \geq \frac{1}{2}\frac{1}{2} + \delta + \alpha \geq 0 \quad (۲۲)$$

در برنامه ANSYS5.4 مقادير α و δ به شرح زيـر بـه کـار بـرده ميشود:

$$\alpha = \frac{1}{4}(1+\gamma)^2 \; \delta = \frac{1}{2} + \gamma \quad (۲۳)$$

کـه در آن γ عامل کـاهش دامنـه اسـت. مقـدار γ معمـولا برابـر ۰/۰۰۵ در نظر گرفته ميشود که با توجـه بـه شـرايط همگرايـي فوق, معادله نيومارک پايدار و همگرا خواهد شد.

۵- تعيين دامنه ارتعاشي پي در حالت بارگذاري ارتعاشـي پويا و مقايسه با حالت ايستا

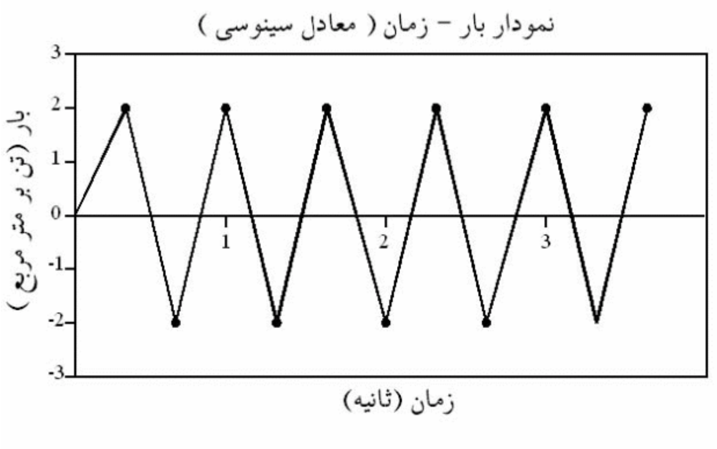
شايد اين سؤال مطرح شود که چه تفاوتي بين تحليل پويـا و ايستا وجود دارد. معادله حاکم بر رفتار يک جسم در حالـت پويـا به شکل زير است:

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [k]\{U\} = \{f(t)\} \quad (۲۴)$$

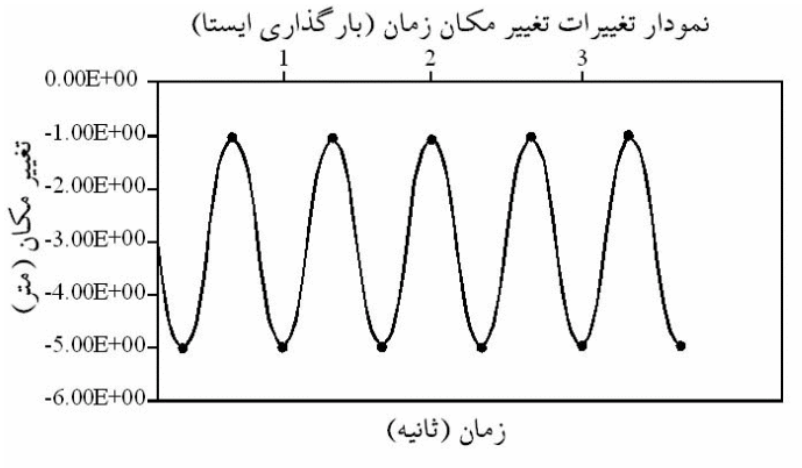
معادله اخير رفتار جسم را تحت تأثير بارهـا نـشان مـيدهـد کـه نتايج به دست آمده از معادله فوق, پاسـخهاي مربـوط بـه حالـت ايستا هستند. حال, اگر اثرات نيروي ماند و نيروي ميرايي در نظر گرفته شود, تحليل از نوع پويا خواهد بود. در زير مثالي که تحت بارگـذاري ايـستا و پويـا مطـابق نمـودار (۱), توسـط نـرم افـزار ANSYS5.4 انجام گرديده, آمده است. شکل پـي مربعـي بـوده و خـــاک زيـــر آن داراي مشخـــصات, E برابـــر ۱۰۰۰ کيلـــوگرم برسانتيمتر مربع, ν مساوي با ۰/۲۵, c برابر با ۰/۱ کيلـوگرم بـر سانتيمتر مربع, ϕ برابر با ۳۰ درجه و جرم واحـد حجـم ۱۹۵۰ کيلوگرم بر مترمربع ميباشد. پي فوق تحـت بـار ارتعاشـي ۲ تـن برمترمربع و با دوره بارگذاري, T, برابر ۰/۸ قرار گرفـت. نتـايجي که در حالت ايستا و پويا حاصل گرديد, در نمودارهاي (۲) و (۳)

آمده است. با مقایسه این دو نمودار میتـوان دریافـت کـه دامنـه ارتعاش در حالت پویا نمودار خیلي بیشتر از حالـت ایـستا اسـت.

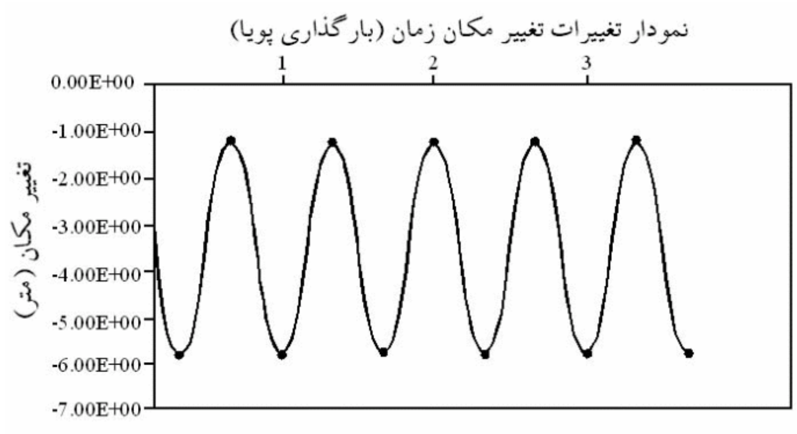
بنابراین باید در تحلیل پي تحت بارهاي ارتعاشـي, اثـرات نیـروي ماند و نیروي میرایي در نظر گرفته شود.



شکل ۱- نمودار بار - زمان



شکل ۲- نمودار تغییر مکان - زمان (بارگذاری ایستا)



زمان (ثانیه)

شکل ۳- نمودار تغییر مکان - زمان پی تحت بارگذاری پویا

۶- محاسبه دامنه نوسان پیهاي مربعي تحت بار ارتعاشي قائم

در این بخش, براي پي با شکل مربعي, تحت بار ارتعاشي سینوسي, با بسامدهاي مختلف حل گردیده است, و با روش نیمفضاي کشسان مورد مقایسه قرار گرفته است. در روشهاي سنتي, با فرض کشسان بودن خاک, دامنه نوسان, که همان میزان نشست پي است, حاصل میشود [۲]. در طراحي پي, باید میزان دامنه ارتعاش محاسبه شود و با مقدار مجاز آن مورد مقایسه قرار گیرد. بنابراین اگر از روشهاي قدیمي استفاده شود, براي هر مقدار بار و براي هر بسامد بارگذاري, دامنه ارتعاش در حالت کشسان خاک به دست میآید. بر این اساس هیچ شناختي نسبت به رفتار مومساني خاک حاصل نمیشود. با تحلیل پویاي مدل ساخته شده به کمک ANSYS5.4, این نتیجه حاصل شد که در میزان بارگذاري خیلي کم و در بسامدهاي پایین, ممکن است خاک به صورت کشساني رفتار کند, اما در بسامدهاي بالاتر, حتي در میزان بار کم, در لحظه اول بارگذاري, خاک زیر پي نشست زیاد میکند و خاک رفتار مومساني از خود نشان میدهد, سپس با یک دامنه ثابت به نوسان ادامه میدهد. نشست اولیه و دامنه نوسان به دست آمده از بارگذاري یک پي مربعي, با مساحت یک مترمربع بر روي خاکي با مشخصات $E=1000kg/cm^2$, $\nu=0.25$, $c=1kg/cm^2$, $\phi=0$ و $\rho=1950kg/cm^3$ جدول (۱) تنظیم شده است. یادآور میشود, میزان بار وارده بر پي در همه بسامدها یک تن بر مترمربع میباشد. همچنین از روش نیم فضاي کشسان مثالهاي فوق حل گردید و با مقدار به دست آمده از ANSYS5.4 مقایسه شد. نتایج به دست آمده از دو روش, سازگاري خوبي را نشان میدهند.

۷- تعیین اندازه نشست پي مستطیلي، تحت بار ارتعاشي ماشین آلات

بیشتر روشهاي قدیمي تحلیل پي, مانند روش نیم فضاي کشسان و روش جرم- فنر بارکان براي به دست آوردن دامنه ارتعاشي پي, با شکل دلخواه از سطح مقطع دایرهاي استفاده میکنند و اثر شکل پي را در محاسبات دامنه ارتعاش دخالت نمیدهند. با مدل ساخته شده مثالهاي قسمت قبل براي پي مستطیلي با سطح مقطع ۱ متر مربع و ابعاد ۰/۵×۲ متر حل گردید, نتیجههاي به دست آمده در جدول (۲) نشان داده شدهاند. همچنین این نتایج با جوابهاي حاصل از روش نیم فضا, مورد مقایسه قرار گرفت که نتایج فوق در جدول (۲) آمده است.

۸- مقایسه نتایج به دست آمده براي پیهاي مربعي و مستطیلي

در این قسمت نتایجي که با تحلیل مدل شناخته شده است, براي پیهاي مستطیلي و مربعي, مورداستفاده قرار گرفته است. از جدول (۳) فوق مشاهده میشود که شکل پي بر میزان دامنه ارتعاش تأثیرگذار است و پیهاي مستطیل شکل, داراي نشست کمتري نسبت به پي با شکل مربعي است. همچنین براساس جدول مذکور میتوان نتیجه گرفت که دامنه ارتعاش پي تحت بار پویاي ماشین آلات براي پیهاي با شکل مربعي بیشتر از دامنه ارتعاش براي پیها, با شکل مستطیل است.

جدول ۱- مقایسه نتایج به دست آمده از مدل ساخته شده با روش نیم فضا (پي مربعي)

نتایج روش نیم فضا دامنه نوسان (متر)	نتایج ANSYS دامنه نوسان (متر)	نتایج ANSYS نشست اولیه (متر)	دوره بارگذاري (ثانیه)
۸/۳۱۲۴*۱۰$^{-۵}$	۷/۳۵*۱۰$^{-۵}$	۷/۳۵*۱۰$^{-۵}$	۲
۸/۳۱۶*۱۰$^{-۵}$	۷/۴۵*۱۰$^{-۵}$	۷/۴۵*۱۰$^{-۵}$	۱
۸/۳۳*۱۰$^{-۵}$	۷/۵۳*۱۰$^{-۵}$	۰/۰۰۲۳۹	۰/۵
۸/۴۴*۱۰$^{-۵}$	۷/۸۰*۱۰$^{-۵}$	۰/۰۰۷۰۳۷	۰/۲
۸/۶۷۶*۱۰$^{-۵}$	۷/۹۵*۱۰$^{-۵}$	۰/۰۱۵۵۷۳	۰/۱۲
۹/۸۵۵۷*۱۰$^{-۵}$	۸/۴۵*۱۰$^{-۵}$	۰/۰۳۰۵۲۸	۰/۰۶
۱/۱۷*۱۰$^{-۴}$	۹/۸۵*۱۰$^{-۵}$	۰/۰۶۵۵۸۳	۰/۰۴

جدول ۲- مقايسه نتايج به دست آمده از مدل ساخته شده با روش نيم فضا (پي مستطيلي)

نتايج روش نيم فضا دامنه نوسان (متر)	نتايج ANSYS دامنه نوسان (متر)	نتايج ANSYS نشست اوليه (متر)	دوره بارگذاري (ثانيه)
۸/۳۱۲۴*۱۰$^{-۵}$	۶/۲۰*۱۰$^{-۵}$	۶/۲۰*۱۰$^{-۵}$	۲
۸/۳۱۶*۱۰$^{-۵}$	۶/۳۵*۱۰$^{-۵}$	۶/۳۵*۱۰$^{-۵}$	۱
۸/۳۳*۱۰$^{-۵}$	۶/۶۵*۱۰$^{-۵}$	۶/۶۵*۱۰$^{-۵}$	۰/۵
۸/۴۴*۱۰$^{-۵}$	۷/۰۵*۱۰$^{-۵}$	۰/۰۰۱۷	۰/۲
۸/۶۷۶*۱۰$^{-۵}$	۷/۱۷*۱۰$^{-۵}$	۰/۰۰۸۳۰۲۱	۰/۱۲
۹/۸۵۵۷*۱۰$^{-۵}$	۷/۵۰*۱۰$^{-۵}$	۰/۰۲۱۳۴۳	۰/۰۶
۱/۱۷*۱۰$^{-۴}$	۸/۱۰*۱۰$^{-۵}$	۰/۰۳۲۸۱۲	۰/۰۴

جدول ۳- مقايسه نتايج به دست آمده براي پي مستطيلي و پي مربعي در حالت بارگذاری ارتعاشي

دامنه نوسان (متر) پي مستطيلي	دامنه نوسان (متر) پي مربعي	نشست اوليه (متر) پي مستطيلي	نشست اوليه (متر) پي مربعي	دوره بارگذاری (ثانيه)
۶/۲۰*۱۰$^{-۵}$	۷/۳۵*۱۰$^{-۵}$	۶/۲۰*۱۰$^{-۵}$	۷/۳۵*۱۰$^{-۵}$	۲
۶/۳۵*۱۰$^{-۵}$	۷/۴۵*۱۰$^{-۵}$	۶/۳۵*۱۰$^{-۵}$	۷/۴۵*۱۰$^{-۵}$	۱
۶/۶۵*۱۰$^{-۵}$	۷/۵۳*۱۰$^{-۵}$	۶/۶۵*۱۰$^{-۵}$	۰/۰۰۲۳۹	۰/۵
۷/۰۵*۱۰$^{-۵}$	۷/۸۰*۱۰$^{-۵}$	۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۷۰۳۷	۰/۲
۷/۱۷*۱۰$^{-۵}$	۷/۹۵*۱۰$^{-۵}$	۰/۰۰۸۳۰۲۱	۰/۰۱۵۵۷۳	۰/۱۲
۷/۵۰*۱۰$^{-۵}$	۸/۴۵*۱۰$^{-۵}$	۰/۰۲۱۳۴۳	۰/۰۳۰۵۲۸	۰/۰۶
۸/۱۰*۱۰$^{-۵}$	۹/۸۵*۱۰$^{-۵}$	۰/۰۳۲۸۱۲	۰/۰۶۵۵۸۳	۰/۰۴

۹- نتيجه گيري

۱- خاک زير پي زير اثر بار ارتعاشي ماشين ممکن است به حالت مومسان برسد و اين مسئله بايد در طراحي مورد توجه قرار گيرد.

۲- شکل پي بر اندازه دامنه ارتعاش تأثيرگذار است. از انجام تحليلها، اين نتايج به دست آمد که پي مستطيلي داراي دامنه ارتعاش کمتري نسبت به پي مربعي است. همچنين، نشست اوليه که در لحظه اول بارگذاري ارتعاشي به دست ميآيد، براي پيهاي مستطيلي، کمتر از پيهاي مربعي ميباشد.

۳- با افزايش بسامد ميزان نشست اوليه و همچنين دامنه ارتعاش افزايش مييابد.

۴- استفاده از جزء تماسي CONTACT49 در حالت سه بعدي و CONTAC48 در حالت دو بعدي، در حالتهاي ايستا و پويا نتيجههاي خوبي ميدهد.

۵- استفاده از پي مستطيلي نسبت به پي مربعي در حالت بارگذاري ارتعاشي مناسبتر است.

۶- براي تحليل واقعيتر پي، تحت بار ارتعاشي، بايد اثرهاي نيروي ماند $[M]\{\ddot{u}\}$ و نيروي ميرايي $[C]\{\dot{u}\}$ را در نظر گرفت. در غير اينصورت پاسخهاي به دست آمده غير محافظهکارانه خواهد بود.

مراجع

[1] Richart. F. E., Woods R. D., Vibration of Soils and Foundation, PRENTIC-Hall, INC, (1970).

[2] Prakash Sh., Puri K. V., Foundation for Machines, Analysis and Design, John Wiley (1988).

[3] Das B. M, Principles of Soils Dynamics, PWS-KENT Publications, (1993).

[4] Dobry R., Gazetas G., Stokoe K. H., “Dynamic Response of Arbitrarily Shaped Foundations”,

Geotech. Eng., ASCE, Vol.12, No. 2, pp.136-149 (1986).

[5] Gazetas G., “Formulas and Charts for Impedances of Surface and Embedded foundations”, Geotech. Eng., ASCE, Vol.117, No. 9, pp.1363-1381 (1991).

[6] Hatzikonstantinou E., Tassoulas J. L., Gazetas G., Kostanopoulos P., Fotopoulou M., “Rocking Stiffness of Arbitrarily Shaped Embedded Foundations”, Geotech. Eng., ASCE, Vol. 115, No. 4, pp.457-471 (1989).

[7] Fotopoulou M., Kots Anopoulos P., Gazetas G., Tassoulas J. L., “Rocking Damping of Arbitrarily Shaped Embedded Foundation”, Geotech. Eng., ASCE, Vol. 115, No. 4, pp. 473-489 (1989).

[8] Gazetas G., Stoke K. H., “Free Vibration of Embedded Foundation: Theory versus Expriment”, Geotech. Eng., ASCE, Vol.117, No. 9, pp. 1382-1401 (1991).

[9] Ahmad Sh., Gazetas G., “Tortional Stiffness of Arbitrarily Shaped Embedded Foundations”, Geotech. Eng., ASCE, Vol.118, No. 8, pp. 1168-1185 (1992).

[10] Gazetas G., Tassoulas J. L., “Horizontal Stiffness of Arbitrarily Shaped Embedded Foundation”, Geotech. Eng., ASCE, Vol. 113, No. 5, pp. 440-457 (1987).