

فرشید مریخ^۱، رضا علیمردانی^۲ و علی باباخانی^۲

۱- کارشناس ارشد مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، پست الکترونیک: merrikh@rifi-ac.ir

۲- عضو هیأت علمی دانشگاه تهران.

تاریخ دریافت: ۸۵/۸/۸ تاریخ پذیرش: ۸۵/۱۰/۱۳

چکیده

یکی از اصلی ترین مشکلات استفاده از ماشین در عرصه های کشاورزی و منابع طبیعی و به ویژه برای ماشین های کشنده در جنگل که عموماً بسیار سنگین هستند، کوبیدگی و افزایش فشردگی خاک می باشد. اگرچه در اراضی کشاورزی با استفاده از روشها و ماشین های خاکورزی می توان تا حدودی فشردگی خاک را اصلاح نمود، ولی در عرصه های منابع طبیعی به ویژه جنگل این کار امکان پذیر نیست. به همین دلیل قبل از کاربرد ماشین در جنگل باید پیش بینی های لازم را اتخاذ نمود و با انتخاب روش صحیح بهره برداری و نوع ماشین از افزایش بیش از حد فشردگی خاک جلوگیری کرد. یکی از روش های تعیین وضعیت تراکم خاک، بررسی نیروهای اعمال شده به خاک است که برای این کار نیاز به اندازه گیری تمام تنش های موجود در خاک و تعیین تنسور تنش می باشد. بدین منظور تبدیلی طراحی شد که تنش های عمودی را در شش جهت مشخص اندازه گیری کند تا با داشتن شش تنش عمودی، تنش های برشی مورد نیاز نیز محاسبه شوند. مبدل از دو قسمت هسته مرکزی و حس کننده های فشار تشکیل شده است که هسته مرکزی جسمی آلومینیومی می باشد و شش حس کننده فشار در زاویه های معین روی آن نصب شده اند. سیستم جمع آوری داده ها شامل دیتالاگر، چاپگر و ضبط کننده می باشد. با اطلاعات بدست آمده از این مبدل، محاسبه تنش های برشی در خاک میسر و در نهایت تنسور تنش خاک محاسبه می شود. در نهایت تغییرات ایجاد شده در جرم مخصوص خاک که بر اثر عبور ماشین ایجاد می گردد از طریق اطلاعات فوق بدست می آید.

واژه های کلیدی: خاک، تراکم، مبدل، تنسور تنش.

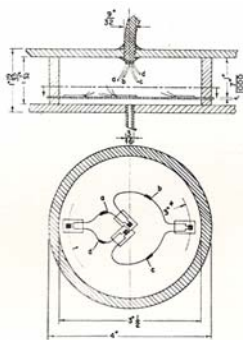
مقدمه

استفاده از ماشین در عرصه های زراعی و منابع طبیعی مشکلاتی را به همراه دارد، به طور مثال اسکیدرهای بزرگ که دارای قدرت زیادی هستند و نیاز به وزن بیشتری برای کاهش لغزش (بکسوات) دارند، مشکلات مهمی برای خاک جنگل بوجود آورده اند. به ویژه توزیع وزن اسکیدر در خاک که باعث ایجاد فشار بر خاک شده و این فشار باعث افزایش تراکم خاک می شود. تراکم بیش از حد باعث بوجود آمدن اثرات نامطلوبی در خاک می گردد که بعضی از این اثرات نامطلوب موجب کاهش نفوذ آب در خاک و جلوگیری از رشد ریشه گیاهان می شوند. مهمترین گام برای کنترل تراکم، شناختن آن از طریق داشتن

اطلاعاتی در مورد عوامل بوجود آورنده تراکم می باشد. فشار وارده از سوی چرخ های ماشین های زراعی و جنگلی از جمله عوامل بوجود آورنده تراکم خاک می باشد. مسأله مهم دیگر محاسبه عملی تنش های بوجود آمده در خاک بر اثر عبور ماشین ها است. تحقیقاتی که تا کنون در این زمینه انجام گرفته به دو قسمت تقسیم می شوند: الف) تحقیقاتی در زمینه بدست آوردن مدل ریاضی که به کمک آن و با داشتن مشخصه های مورد نظر رفتار تراکمی خاک مشخص می شود. ب) فعالیتهای انجام شده در جهت طراحی وسایل و ابزار اندازه گیری مشخصه های مورد نیاز.

تحقیقات انجام شده برای طراحی ابزار اندازه‌گیری

در سال ۱۹۵۷ یک مبدل (transducer) اندازه‌گیری فشار عمودی توسط کوپر و همکارانش طراحی شد که توسط کرنش‌سنج (strain gauge) کار می‌کرد (Cooper et al., 1957). مبدل در عمق دلخواه از خاک در مسیر حرکت تراکتور قرار گرفته و فشاری که بر اثر عبور تراکتور در خاک تولید می‌شد توسط کرنش‌سنج اندازه‌گیری شده و با استفاده از آمپلی‌فایر و ثبات، ثبت می‌گردید (شکل ۱). با ساخته شدن این مبدل و بدست آمدن مدل ریاضی که بیان‌کننده رابطه بین تغییرات جرم مخصوص خاک و مقدار تنش بود، لازم شد تا تغییرات حجم خاک اندازه‌گیری شود. شکل ۲ وسیله‌ای را نشان می‌دهد که قادر است تغییرات حجمی را به صورت مداوم اندازه‌گیری و ثبت کند (Hovansion & Buchele, 1959). این وسیله که مبدل ثبت حجمی نامیده می‌شود قادر بود تغییرات حجم را تا ۰/۰۱ میلی‌لیتر در یک نقطه از توده خاک اندازه‌گیری کند. شکل ۳ مبدل ثبت حجمی را نشان می‌دهد که قادر به اندازه‌گیری تغییرات دینامیکی حجم است. این مبدل بسیار دقیق‌تر و حساس‌تر می‌باشد و اساس کار آن اندازه‌گیری مقدار خمش ایجاد شده در یک صفحه است و تغییرات حجم خاک توسط کرنش‌سنج‌های نصب شده روی صفحه فلزی اندازه‌گیری می‌شوند.



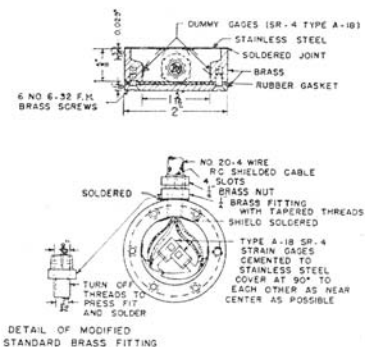
شکل ۳- مبدل اندازه‌گیری تغییرات دینامیکی حجم خاک (Hovansion & Buchele, 1959)



شکل ۲- مبدل اندازه‌گیری تغییرات حجم خاک (Hovansion & Buchele, 1959)

تحقیقات انجام شده برای بدست آوردن مدل ریاضی

تراکم خاک به صورت مشخصه جرم مخصوص خاک در نظر گرفته شده است. *وندن برگ* نشان داد که تراکم در هر نقطه از خاک بر اثر اعمال نیرو بر سطح خاک تغییر می‌کند (Vandenn Berg et al., 1985). با محاسبه این تغییرات، اثرات ناشی از اعمال نیرو بدست آمده و بدین وسیله اطلاعاتی بدست آمد که توسط آنها تراکم خاک قابل پیش‌بینی گردید. این کار با پیدا کردن رابطه بین تنش‌های اعمال شده به حجم یک جزء از خاک با تغییر حجم آن جزء از خاک و اندازه‌گیری اثر مشخصه‌های مختلف خاک بر روی این رابطه انجام گرفت. محقق دیگری به نام *بیلی مدلی* را تعریف کرد که با استفاده از آن در آزمایش‌های سه محوری تغییرات جرم مخصوص در نمونه‌های استوانه‌ای خاک بدست آمد (Nichols et al., 1985). این مدل، رفتار تراکمی خاک در آزمایش‌های سه محوری را که در آن خاک تحت تنش هیدرواستاتیک قرار می‌گیرد به خوبی محاسبه کرد. محقق به نام *ریپر* برای پیش‌بینی وضعیت تراکم خاک از روش *اجزاء محدود* استفاده نمود (Raper, 1987). در این مدل از مشخصه‌های الاستیک خطی مانند *مدول یانگ* و نسبت *پواسون* که برای هر جزء در مدل متغیر می‌باشد، استفاده شده است. با استفاده از این روش و پس از انجام آزمایش مشخص شد که مدل روش اجزاء محدود از دقت خوبی برخوردار است.

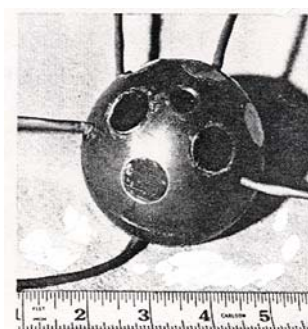
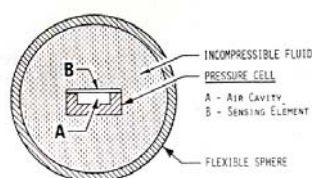


شکل ۱- مبدل اندازه‌گیری فشار عمودی (Cooper et al., 1957)

آآمده از این مبدل، تنسور تنش و تنش‌های عمودی و همچنین کرنش حجمی را می‌دهد. ورملا و همکارانش که روی تراکم خاک کار می‌کردند، معتقد بودند که مبدل‌های صلب فلزی دارای نواقصی هستند. از این رو یک مبدل انعطاف‌پذیر طراحی نمودند (Verma et al., 1979). در این مبدل وقتی فشار به سطح خارجی پوسته کروی انعطاف‌پذیر پر از مایع اعمال می‌شد، فشار به صورت یکنواخت به مایع منتقل و به وسیله عنصر حساسی که در مایع محبوس بود اندازه‌گیری می‌شد (شکل ۵).



شکل ۵- مبدل انعطاف‌پذیر برای اندازه‌گیری فشار هیدرواستاتیک (Verma et al., 1976)

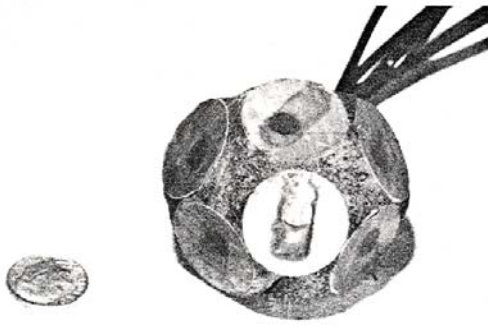


شکل ۴- مبدل اندازه‌گیری تنش در شش جهت (Harris et al., 1964)

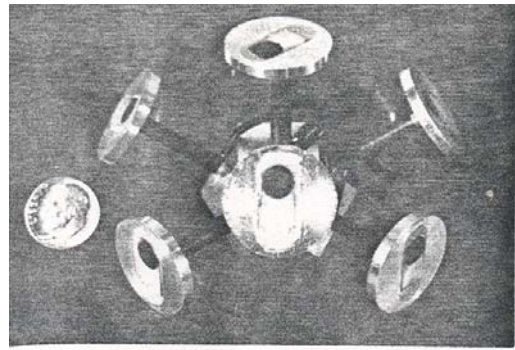
داشت (شکل ۶). بر روی این میله‌ها دیسک‌های فلزی قرار گرفته و بر روی دیسک‌ها کرنش‌سنج‌های دیافراگمی نصب شده بود. این مبدل در عمق مناسب از خاک قرار می‌گرفت و با عبور تراکتور، فشار از طریق خاک به دیسک اعمال شده و خمش بوجود آمده بر روی دیسک را کرنش‌سنج اندازه‌گیری می‌کرد. بدین ترتیب میزان تنش عمودی خاک در شش جهت مختلف اندازه‌گیری شد.

وندن برگ نشان داد که کرنش حجمی (تغییر در میزان تراکم خاک) را می‌توان با تغییرات جرم مخصوص یا تغییرات درصد کل تخلخل خاک تعریف نمود. او ثابت کرد که کرنش حجمی تابع تنش‌های عمودی اصلی است. برای تعریف حالت تنش یک نقطه از خاک باید تنسور تنش آن نقطه در دست باشد بنابراین نیاز به تعیین شش تنش مستقل در شش جهت مختلف است. شکل ۴ یک مبدل شش‌جهته را نشان می‌دهد که دارای شش سنسور اندازه‌گیری نیرو (load cell) در شش جهت مختلف است (Harris et al., 1964). اطلاعات بدست

نیکولز یک مبدل برای اندازه‌گیری تنش خاک در شش جهت مختلف ساخت (Nichols et al., 1984). با بدست آوردن شش تنش عمودی در خاک و از طریق روابط موجود، تنسور تنش خاک و همچنین مشخصه‌های مورد نیاز دیگر مانند تنش‌های اصلی، تنش انحرافی، تنش‌های متوسط و اوکتاهدرال بدست آمد. این مبدل دارای یک مرکز صلب مکعبی شکل از جنس آلومینیوم بود و شش میله با زوایای مشخصی روی این مکعب قرار



شکل ۶-ب- مبدل اندازه‌گیری تنش در شش جهت



شکل ۶-الف- هسته فلزی مبدل اندازه‌گیری تنش در شش جهت

تنسور تنش

برای محاسبه تغییرات تراکم خاک از طریق نیروهای اعمال شده، بدست آوردن تنسور تنش در نقطه مورد نظر که یک المان مکعبی فرض می‌گردد، ضروری است. تنسور تنش این نقطه ماتریسی به قرار زیر می‌باشد:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix}$$

به‌علت تعادل نیروها تنها سه تنش فشاری و سه تنش

برشی مد نظر قرار می‌گیرد، پس:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ 0 & \sigma_y & \tau_{yz} \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{bmatrix}$$

بنابراین سه تنش عمودی σ_x ، σ_y ، σ_z و سه تنش برشی τ_{xy} ، τ_{xz} ، τ_{yz} باید محاسبه می‌شدند. تعیین تنش‌های عمودی با بکار بردن مبدل‌های فشار میسر می‌باشد، ولی اندازه‌گیری تنش‌های برشی از این طریق امکان‌پذیر نیست. به منظور محاسبه تنش‌های برشی به‌صورت زیر عمل شد:

بررسی‌ها نشان می‌دهد که: الف) اکثر مبدل‌های فشار موجود تنش را در یک جهت اندازه‌گیری می‌کنند. ب) مبدل‌های ساخته شده توسط محققان به‌دلیل کاربرد تحقیقی‌شان و عدم توجه اقتصادی به بازار عرضه نشده‌اند. ج) ساخت مبدل‌های شش‌جهته با استفاده از کرنش‌سنج دیافراگمی به تکنولوژی پیشرفته‌ای نیازمند است. از این رو در طرح حاضر مبدلی طراحی شد که از مکانیزم ساده‌ای برخوردار می‌باشد.

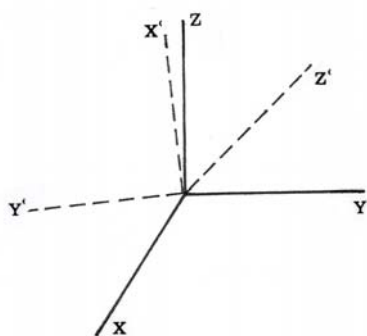
مواد و روشها

فشردگی خاک (compression)، تراکم (compaction)،

تحکیم (consolidation)

یکی از عوامل اصلی در ایجاد فشردگی، کاهش خلل و فرج موجود در خاک است. در پی فشردگی، چگالی ظاهری خاک افزایش می‌یابد. خاک با فشار استاتیکی یا دینامیکی و یا با لرزاندن فشرده می‌گردد. اگر هوا از خلل و فرج خارج شود، تراکم و اگر آب خارج شود تحکیم صورت گرفته است. در اثر اعمال فشار ابتدا خروج هوا و بعد خروج آب روی می‌دهد. از نظر کشاورزی زمانی که مجموع خلل و فرج خاک آنقدر کم شود که تهویه محدود یا زهکش و نفوذ ریشه کند گردد، لایه‌های خاک فشرده شده است. علت اصلی تراکم خاک نیروهای مکانیکی است که توسط انسان و ماشین‌های سنگین وارد می‌شود (Hillel, 1982).

اگر مشخصه‌های تنش عمودی در سه جهت عمود بر هم محوره‌های مختصات X, Y و Z اندازه‌گیری شوند و مشخصه‌های تنش عمودی در سه جهت دلخواه دیگر نیز بدست آیند، با داشتن زوایای بین این محورها و با جایگذاری تنش‌های عمودی و کسینوس‌های هادی در روابط I, II و III تنش‌های برشی محاسبه می‌شوند. بدین ترتیب با قرارگیری شش حس‌کننده فشار برای اندازه‌گیری تنش‌های عمودی در شش جهت معین، تنش‌های فشاری و برشی بدست می‌آیند. برای این کار باید وضعیت قرارگیری حس‌کننده‌ها نسبت به هم تعیین و بر اساس آن یک هسته مرکزی که محل قرارگیری حس‌کننده‌ها است طراحی شود. دو محور مختصات XYZ و X'Y'Z' که بر هم منطبق هستند در نظر گرفته شد. محوره‌های مختصات X'Y'Z' حول محور Z به اندازه ۲۲۵° چرخانده شد (شکل ۷). زوایای دوران را می‌توان به صورت دلخواه انتخاب نمود و این انتخاب بر اساس محدودیت فضایی در طراحی مبدل و همچنین حفظ تقارن شکل مبدل می‌باشد. در وضعیت جدید، صفحه x'y' از محور مختصات X'Y'Z' را حول محور X به اندازه ۴۵°- چرخانده و وضعیت جدید به صورت شکل ۸ درآمد.



شکل ۸- وضعیت محوره‌های X'Y'Z' نسبت به محور مختصات XYZ پس از دوران صفحه x'y' حول محور X به اندازه ۴۵°-

ثابت نگه داشته و X''Y''Z'' حول محور Y به اندازه ۱۵°- چرخانده شد (شکل ۹). همانطور که بیان شد برای بدست آوردن تنش‌های برشی نیاز به داشتن شش تنش عمودی

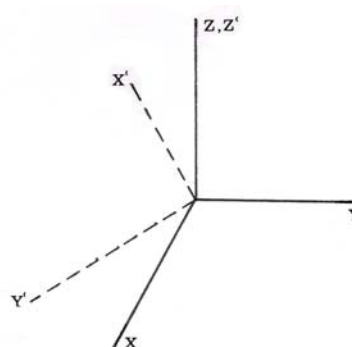
تنسور تنش فوق مربوط به محوره‌های مختصات X, Y و Z است. اگر تنش‌های عمودی و برشی مربوط به صفحه‌های X, Y و Z موجود باشد در این صورت تنش‌های عمودی مربوط به هر محور مختصات دیگر از این مکعب که با x', y' و z' مشخص شده‌اند از روابط زیر بدست می‌آیند (شاگری و نخعی، ۱۳۷۲):

$$\begin{aligned} \sigma_x &= (L_1^2)\sigma_x + (m_1^2)\sigma_y + (n_1^2)\sigma_z + 2 L_1 m_1 \tau_{xy} + 2 m_1 n_1 \tau_{yz} + 2 n_1 L_1 \tau_{xz} & \text{I} \\ \sigma_y &= (L_2^2)\sigma_x + (m_2^2)\sigma_y + (n_2^2)\sigma_z + 2 L_2 m_2 \tau_{xy} + 2 m_2 n_2 \tau_{yz} + 2 n_2 L_2 \tau_{xz} & \text{II} \\ \sigma_z &= (L_3^2)\sigma_x + (m_3^2)\sigma_y + (n_3^2)\sigma_z + 2 L_3 m_3 \tau_{xy} + 2 m_3 n_3 \tau_{yz} + 2 n_3 L_3 \tau_{xz} & \text{III} \end{aligned}$$

در روابط فوق L, m و n کسینوس‌های هادی دو محور مختصات - کسینوس زوایای بین محوره‌های مختصات هستند که به صورت زیر مشخص می‌شوند:

جدول ۱- مقادیر کسینوس‌های هادی

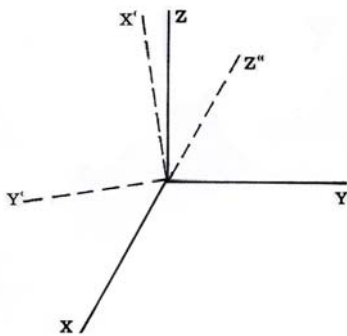
Z	Y	X	
n	m	L	X'
n	m	L	Y'
n ₃	m ₃	L	Z'



شکل ۷- وضعیت محوره‌های X'Y'Z' نسبت به محور XYZ پس از دوران آن حول محور Z به اندازه ۲۲۵°

در این حالت محور مختصات جدیدی به نام X''Y''Z'' در نظر گرفته شد که منطبق بر محور مختصات X'Y'Z' بود. محور مختصات X'Y'Z' را در این حالت

بدست آمده است (شکل ۱۰).



شکل ۱۰- محورهایی که تنش‌های عمودی بر آنها اعمال شده‌اند

برشی را از روابط I, II و III بدست آورد. کسینوس‌های هادی را در روابط مذکور قرار داده و روابط زیر بدست آمد:

$$\sigma_x = (-0.707^2)\sigma_x + (-0.5^2)\sigma_y + (0.5^2)\sigma_z + 2(-0.707)(-0.5)\tau_{xy} + 2(-0.5)(0.5)\tau_{yz} + 2(-0.707)(0.5)\tau_{xz}$$

$$\sigma_y = (0.707^2)\sigma_x + (-0.5^2)\sigma_y + (0.5^2)\sigma_z + 2(0.707)(-0.5)\tau_{xy} + 2(-0.5)\tau_{yz} + 2(0.707)(0.5)\tau_{xz}$$

$$\sigma_z = (0.183^2)\sigma_x + (-.707^2)\sigma_y + (0.683^2)\sigma_z + 2(0.183)(0.707)\tau_{xy} + 2(0.707)(0.683)\tau_{yz} + 2(0.183)(0.683)\tau_{xz}$$

روابط فوق یک دستگاه سه مجهولی برحسب تنش‌های برشی می‌باشند که با حل آن، تنش‌های برشی به صورت زیر محاسبه شدند:

$$\tau_{yz} = \sigma_x + 0.5(\sigma_y + \sigma_z) - \sigma_x - \sigma_y \quad \text{IV}$$

$$\tau_{xz} = 0.196\sigma_z + 2.246\sigma_x + 1.55\sigma_y + 1.965\sigma_x - 1.931\sigma_y - 1.864\sigma_z \quad \text{V}$$

$$\tau_{xz} = 1.539\sigma_x + 2.257\sigma_y + 1.965\sigma_z - 1.965\sigma_x - 1.931\sigma_y - 1.864\sigma_z \quad \text{VI}$$

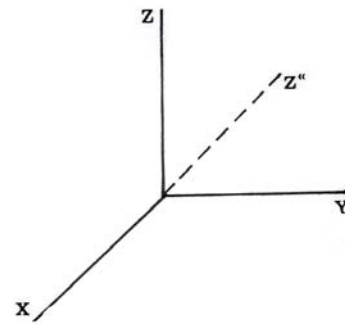
مبدل

مبدل طراحی شده از دو قسمت هسته مرکزی و حس‌کننده‌های فشار تشکیل شده است:

حس‌کننده‌های فشار

از آنجایی که خاک یک محیط متخلخل می‌باشد بنابراین نیروهای اعمال شده از طرف خاک به اجسام،

در شش جهت مختلف است. فرض شده است که تنش‌های عمودی روی محورهای X, Y, Z, X', Y', Z'' و



شکل ۹- وضعیت محور Z'' نسبت به محور مختصات XYZ

برای بدست آوردن تنش‌های برشی، ابتدا باید کسینوس‌های هادی بین محورها محاسبه گردند. برای محاسبه این مقادیر باید وضعیت محورهای X', Y', Z'' پس از دوران حول محورهای X, Y, Z مشخص می‌شود. برای این منظور از چرخش بردارهای محورهای X, Y, Z از طریق ماتریس دوران به اندازه زاویه‌های معین استفاده شد و زوایای بین محورها مطابق جدول ۲ بدست آمد.

جدول ۲- زاویه بین محورها بر حسب درجه

	Z	Y	X
X'			
Y'			
Z''	/		/

با محاسبه زوایای بین محورها، کسینوس‌های هادی محورها مطابق جدول ۳ محاسبه شد.

جدول ۳- کسینوس‌های هادی محورها

	Z	Y	X
X'	/	/	/
Y'	/	/	/
Z''	/	/	/

اگر فرض شود که تنش‌های عمودی روی محورهای X, Y, Z, X', Y', Z'' و اندازه‌گیری شده است و نیز با داشتن کسینوس‌های هادی این محورها، می‌توان تنش‌های

نتایج

طراحی هسته مرکزی

برای بدست آوردن تنش‌های عمودی باید از شش حس‌کننده فشار بهره برد. این حس‌کننده‌ها عمود بر محورهای X, Y, Z, X', Y', Z' در نظر گرفته شد. زاویه‌ای که این حس‌کننده‌ها نسبت به هم می‌سازند مطابق جدول ۲ می‌باشد همچنین فاصله آنها تا مرکز دلخواه O باید مساوی باشد. برای ثابت ماندن زاویه بین حس‌کننده‌ها و فاصله حس‌کننده‌ها از مرکز O نیاز به یک هسته مرکزی بود که حس‌کننده‌ها بر روی آن نصب شوند. برای طراحی هسته مرکزی، سه مکعب که روی هم منطبق شدند را در نظر گرفته و فرض گردید مراکز سه مکعب بر روی هم ثابت شده‌اند و می‌توان مکعب‌ها را حول مراکزشان تحت هر زاویه دلخواهی چرخاند. برای انتخاب ابعاد مکعب‌ها و نیز زوایای دوران مکعب‌ها دو مسأله وجود داشت:

ابتدا فرض شد که مبدل یک المان کوچک از خاک می‌باشد، پس مطابق این فرض طول ضلع مکعب‌ها باید حتی‌الامکان کوچک باشد. بعد از آنجایی که حس‌کننده‌های فشار روی سطوح مکعب‌ها نصب می‌گردند و ابعاد حس‌کننده‌ها نیز نباید خیلی کوچک باشد پس این ابعاد نیز یک عامل محدودکننده برای انتخاب طول ضلع مکعب‌ها می‌باشد. حس‌کننده‌های فشار طراحی شده از یک کرنش‌سنج و یک عنصر ارتجاعی تشکیل شده است. نسبت طول کرنش‌سنج به طول تیر باید کوچک باشد در غیر این صورت دقت کاهش می‌یابد، بنابراین طول تیر باید حتی‌الامکان بزرگ انتخاب می‌شد. به این ترتیب دو عامل محدودکننده مخالف هم وجود داشت که باید هر دو عامل مد نظر قرار می‌گرفت.

کرنش‌سنج در نظر گرفته شده 0.6 میلی‌متر طول دارد و طبق محاسبات اگر طول تیر صد برابر این مقدار یعنی شش سانتیمتر تعیین می‌شد، دقت حس‌کننده‌ها مناسب

به صورت نیروهای گسترده فرض شده است. در این تحقیق برای اندازه‌گیری تنش‌های محوری از حس‌کننده‌های فشار که دارای دو قسمت عنصر ارتجاعی و کرنش‌سنج می‌باشند استفاده شده است.

۱- عنصر ارتجاعی - عنصر ارتجاعی از یک تیر فولادی که بر اثر اعمال نیرو خم می‌شود، تشکیل شده (شکل ۱۱) و تغییرات نیرو به تغییرات کرنش سطحی در سطح تیر فولادی تبدیل گشته و با اندازه‌گیری تغییرات کرنش، تنش‌های محوری محاسبه می‌گردند. این تیر فولادی از یک سر روی پایه‌ای ثابت و انتهای دیگر آن روی پایه دوم آزاد است.



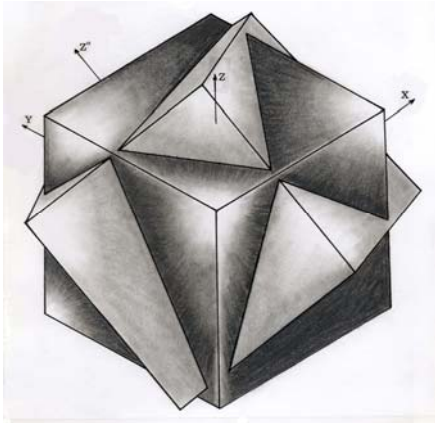
شکل ۱۱- نمای عنصر ارتجاعی

۲- کرنش‌سنج - کرنش‌سنج از یک رشته سیم مقاومت الکتریکی نازک که به صورت شبکه روی ورق نازک مخصوصی قرار گرفته تشکیل شده است. کرنش‌سنج روی سطح عنصر ارتجاعی نصب می‌شود و تغییرات کرنش را به تغییرات مقاومت الکتریکی تبدیل می‌کند. تغییرات مقاومت الکتریکی توسط پل ویستون به تغییرات ولتاژ تبدیل می‌شود.

سیستم جمع‌آوری داده‌ها

برای گردآوری داده‌ها از مبدل، سیستم جمع‌آوری داده‌ها و سیستم تجزیه و تحلیل اطلاعات در نظر گرفته شد که می‌تواند متغیر و با توجه به امکانات موجود انتخاب گردد. سیستم پیشنهادی از یک میکرولاگر 21XL، یک ضبط نوار کاست دیجیتال و یک چاپگر تشکیل شده است (Alimardani, 1987).

صفحه‌های مکعب‌های دو و سه یعنی عمود بر صفحه‌های P_x, P_y, P_z بودند. مراکز سه محور مختصات بر روی هم و روی مراکز سه مکعب قرار گرفتند. فرض شد که با چرخش محورهای مختصات $X'Y'Z'$ و $X''Y''Z''$ مکعب‌های دوم و سوم نیز به همراه آنها می‌چرخند. ابتدا مکعب دوم و سوم را حول محور Z به اندازه 225° چرخانده بعد این دو مکعب حول محور X به اندازه 45° چرخانده شدند. در حالت جدید جسم به حالتی که در شکل ۱۲-الف نشان داده شده است در آمد. در این حالت مکعب دوم را ثابت نگه داشته و مکعب سوم حول محور Y به اندازه 15° چرخانده شد. وضعیتی که مکعب سوم نسبت به مکعب اول می‌گیرد بدون در نظر گرفتن مکعب دوم در شکل ۱۲-ب نشان داده شده است.

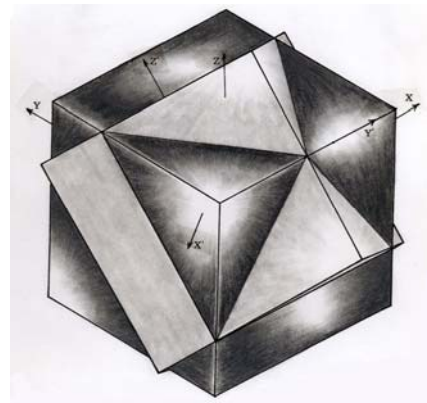


شکل ۱۲-ب- مکعب روشن 225° حول محور Z و 45° حول محور X و 15° حول محور Y چرخیده است.

روی هم قرار گرفته‌اند با نصب یک حس‌کننده فشار بر روی صفحه P_z از مکعب سوم، تنش عمودی روی محور Z'' نیز بدست آمد. در نهایت نیاز به جسمی بود که ترکیبی از شکل‌های ۱۲-الف و ۱۲-ب با حذف قسمت‌های اضافی باشد که جسم مورد نیاز به صورتی که در شکل ۱۳ نشان داده شده است بدست آمد. صفحه‌های $P_x, P_y, P_z, P_x', P_y', P_z'$ و P_x'', P_y'', P_z'' صفحه‌هایی هستند که حس‌کننده‌های فشار روی آنها نصب می‌شدند.

می‌گشت. به منظور نصب عنصر ارتجاعی روی هسته مرکزی یک سانتیمتر اضافه بر طول عنصر ارتجاعی مورد نیاز بود. در نهایت طول عنصر ارتجاعی حس‌کننده فشار و طول ضلع مکعب‌ها هفت سانتیمتر بدست آمد. پهنای کرنش‌سنج یک میلیمتر است، بنابراین عرض عنصر ارتجاعی چهار میلیمتر انتخاب شد. برای محاسبه زوایای دوران باید این مهم مد نظر قرار می‌گرفت که پس از دوران مکعب‌ها، وجه‌ها سطح کافی برای نصب حس‌کننده‌ها داشته باشند. برای این منظور با استفاده از روش سعی و خطا زوایای دوران انتخاب شدند.

محورهای ثابت X, Y و Z عمود بر صفحه‌های مکعب یک یعنی عمود بر صفحه‌های P_x, P_y, P_z در نظر گرفته شد. به همین ترتیب محورهای X', Y', Z' عمود بر



شکل ۱۲-الف- مکعب روشن 225° حول محور Z و 45° حول محور X چرخیده است.

در مکعب اول با نصب سه حس‌کننده فشار بر روی صفحه‌های P_x, P_y, P_z تنش‌های عمودی بر روی محورهای X, Y و Z بدست آمدند. سه صفحه P_x, P_y و P_z نسبت به مرکز مکعب فواصلی یکسان داشته و فرض شد که تنش‌های بدست آمده تنش‌هایی هستند که بر این نقطه (مرکز مکعب) اعمال می‌شوند. به همین ترتیب اگر روی صفحه‌های P_x', P_y' در مکعب دوم دو حس‌کننده فشار نصب می‌شد این تنش‌ها نیز بر مرکز مکعب دوم اعمال می‌شدند، همان‌طور که بیان شد مراکز سه مکعب

$$X_L = 0.422L$$

مقدار گشتاور در این نقطه به قرار زیر است:

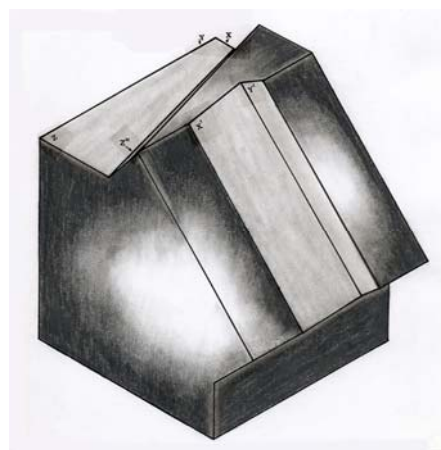
$$M = 0.069qL^2$$

به دلیل محدودیت فضایی که در سطوح مورد نظر وجود داشت، عرض تیر چهار میلیمتر منظور گشت. در آزمایشهای گزارش شده، حداکثر تنش عمودی در خاک 200000 Pa ثبت شده است. فولادی که به عنوان عنصر ارتجاعی در نظر گرفته شد از نوع 50CrV4 با تنش تسلیم 10^6 Pa می‌باشد. بیشترین تنش کششی در سطح زیرین عنصر ارتجاعی و در نقطه‌ای که حداکثر خمش رخ می‌دهد، یعنی در نقطه X_L اعمال می‌شود. برای بدست آوردن ارتفاع مناسب برای تیر، ضریب ایمنی را دو انتخاب نموده و با استفاده از رابطه ممان اینرسی ارتفاع تیر $10^{-4} \times 8/26$ متر محاسبه شد. ضخامت تیر فولادی مورد استفاده در این مبدل یک میلیمتر است و بدین ترتیب ضریب ایمنی افزایش یافته بود. با محاسبه میزان خمش و ضخامت تیر، عمق شیار $1/8$ میلیمتر محاسبه گردید و به منظور اطمینان بیشتر عمق شیار سه میلیمتر در نظر گرفته شد.

مراحل ساخت مبدل

ساخت هسته مرکزی

آلومینیوم به دلیل سبکی و استحکام قابل قبولی که دارد برای ساخت هسته مرکزی انتخاب شد. در این طرح به دلیل وجود محدودیت‌ها تنها به ساخت مدلی از این مبدل اکتفا شده است و هسته مرکزی از تفلون فشرده ساخته شد. با استفاده از نقشه‌ها و اندازه‌های تعیین شده و توسط یک ماشین فرز عمودی (شکل ۱۴) که دارای یک گیره مدرج بود، هسته مرکزی به صورتی که در شکل ۱۵ نشان داده شده است ساخته شد.

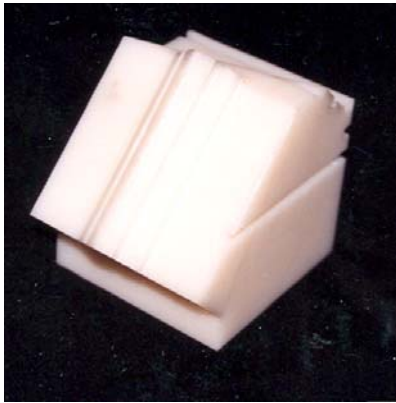


شکل ۱۳- تصویر ایزومتریک هسته مرکزی

محاسبه مشخصه‌های حس‌کننده فشار

برای اندازه‌گیری تنش‌های محوری از شش حس‌کننده فشار که روی صفحه‌های معین قرار گرفته‌اند استفاده شده است. روی صفحه‌های مورد نظر شیارهایی به پهنای عنصر ارتجاعی و به عمق لازم (حداکثر خمش تیر) ایجاد گردید. تیرها توسط دو پایه کوچک که در دو انتهای شیار قرار گرفته‌اند روی هسته مرکزی نصب شده و سطح عنصرهای ارتجاعی با سطح صفحه‌ها تراز شدند. با اعمال تنش بر روی صفحه، عنصر ارتجاعی خم شده و از طریق کرنش‌سنج و بر حسب میزان خمش ایجاد شده تنش عمودی محاسبه می‌گردد.

عمق شیار و محل قرارگیری کرنش‌سنج روی عنصر ارتجاعی که نقطه بروز حداکثر خمش می‌باشد باید تعیین می‌شد. طول عنصر ارتجاعی را L و عرض آن را b و ضخامت را h در نظر گرفته و فرض شد که نیروی گسترده q بر حسب N/m روی تیر اعمال می‌شود. پس از انجام محاسبات و رسم دیاگرام جسم آزاد، منحنی گشتاور خمشی و منحنی خمش مشخصه‌های مورد نیاز بدست آمدند. نقطه‌ای که در آن خمش حداکثر است، از رابطه زیر بدست آمد:



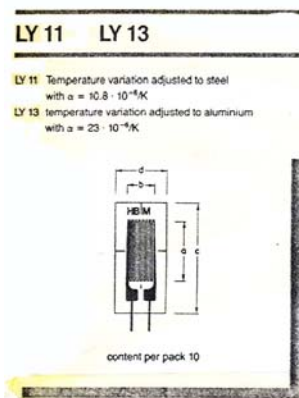
شکل ۱۵- هسته مرکزی



شکل ۱۴- ماشین فرز

میلیمتر آن در دو طرف تیر به عنوان پایه نصب عنصر ارتجاعی روی هسته مرکزی می‌باشد. کرنش‌سنجی که روی عنصر ارتجاعی نصب گردیده دارای مشخصاتی است که در شکل ۱۶ آمده است.

ساخت حس‌کننده فشار حس‌کننده فشار از دو قسمت تشکیل شده است. عنصر ارتجاعی یک تیر فولادی به طول ۷۰، عرض ۴ و ضخامت ۱ میلیمتر از فولاد 50CrV4 می‌باشد. ۶۰ میلیمتر از طول تیر به عنوان عنصر ارتجاعی عمل کرده و ۱۰



Type		Nominal resistance [Ω]	Dimensions [mm]				Max. perm. bridge supply voltage [V]	Solder terminals
LY 11	LY 13		Measuring grid		Measuring grid carrier			
			a	b	c	d		
LY 11 0.6/120	LY 13 0.6/120	120	0.6	1.0	5.0	3.2	1.5	LS 7
LY 11 1.5/120	LY 13 1.5/120	120	1.5	1.2	6.5	4.7	2.5	LS 7
LY 11 3/120 ^{II}	LY 13 3/120	120	3	1.4	9.5	4.5	4.0	LS 7
LY 11 6/120 ^{II}	LY 13 6/120	120	6	2.8	13.0	6.0	8	LS 5
LY 11 10/120	LY 13 10/120	120	10	4.9	18.5	9.5	13	LS 5
LY 11 3/350	LY 13 3/350	350	3	1.5	8.5	4.5	7	LS 7
LY 11 6/350	LY 13 6/350	350	6	2.9	13.0	6.0	14	LS 5
LY 11 10/350	LY 13 10/350	350	10	5	18.5	9.5	23	LS 5

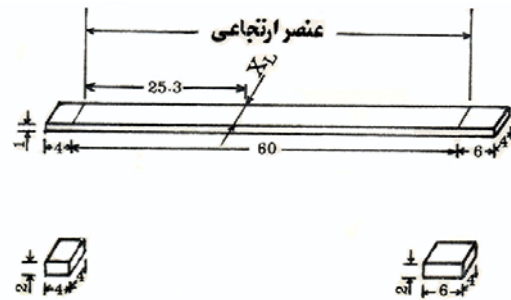
شکل ۱۶- مشخصات کرنش‌سنج

حس‌کننده‌های فشار توسط پایه‌ها روی هسته مرکزی در شیارها نصب می‌شوند. یک سر عنصر ارتجاعی توسط پیچ به هسته مرکزی محکم شده و انتهای دیگر روی پایه آزاد است (شکل ۱۸).

ضریب کرنش‌سنج (Sg) برابر ۲ بوده و محل نصب آن روی تیر در نقطه X_L است که بیشترین خمش روی می‌دهد (شکل ۱۷). محل نصب کرنش‌سنج میان خط X_L روی سطح زیرین عنصر ارتجاعی انتخاب شد.



شکل ۱۸- مبدل و حس‌کننده فشار نصب شده روی آن



شکل ۱۷- ابعاد عنصر ارتجاعی و پایه‌ها و محل نصب کرنش‌سنج

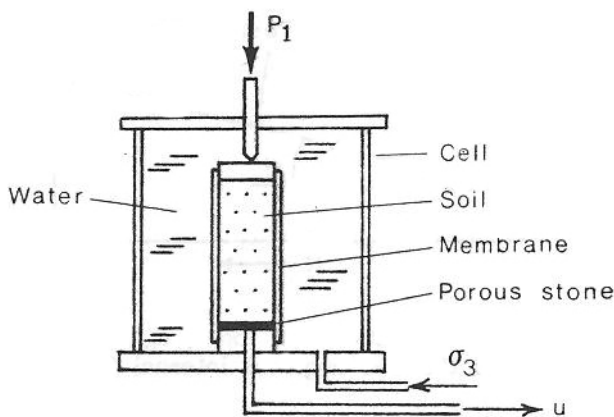
بحث

ارزیابی مبدل

به‌منظور کالیبراسیون و سنجش عملکرد مبدل طراحی شده، آزمایشهایی با دستگاه آزمایش سه محوری در نظر گرفته شد (شکل ۱۹). مبدل در کیسه پلاستیکی دستگاه سه محوری قرار می‌گیرد و کیسه پر از خاک می‌شود. کیسه خاک از پایین به وسیله محور محفظه دستگاه مسدود شده و از بالا نیز مسدود می‌گردد. سیم‌های مبدل از میان محور محفظه دستگاه خارج شده و با سیستم جمع‌آوری داده‌ها مرتبط می‌گردد. به این ترتیب کار مبدل در فشار هیدرواستاتیک معلوم، در حالی که در خاک قرار گرفته است مورد آزمایش قرار می‌گیرد.

نحوه کار مبدل

آزمایشهای عملی را می‌توان در مخزن خاک (soil bin) یا مزرعه انجام داد. برای انجام آزمایشهای مزرعه‌ای در خاک حفره‌ای به عمق مطلوب ایجاد کرده و مبدل طوری در حفره قرار می‌گیرد که محور فرضی Z عمود بر سطح زمین بوده و صفحه P_z به سمت بالا باشد. سپس روی مبدل با خاک پوشانده می‌شود. عمقی از خاک که مورد آزمایش قرار می‌گیرد باید با نقطه مرکزی مبدل و به بیان دیگر با مراکز مکعب‌های اولیه تنظیم شود.



شکل ۱۹- دستگاه آزمایش سه محوری (Mckyes, 1985)

کاربرد نتایج بدست آمده از مبدل

پس از انجام آزمایشها، تنش‌های عمودی $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ ، $\sigma_x', \sigma_y', \sigma_z'$ بدست می‌آیند. با قرار دادن تنش‌های عمودی در روابط IV، V و VI تنش‌های برشی τ_{xy}, τ_{xz} و τ_{yz} بدست آمده و تنسور تنش محاسبه می‌گردد. با داشتن تنسور تنش خاک، مشخصه‌های دیگر مانند تنش‌های اصلی، تنش میانگین و تنش برشی هشت‌وجهی بدست می‌آیند. با اطلاعات بدست آمده از مبدل پس از اعمال تنش، از طریق یک مدل ریاضی تراکم خاک، جرم مخصوص خاک خشک به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد (Nichols et al., 1985):

$$\ln(P) = \ln(P_0) - (A+B*S_h)*(1-\exp(-C*S_h))$$

که در آن:

P : جرم مخصوص خاک خشک kg/m^3

P_0 : جرم مخصوص خاک خشک در تنش صفر kg/m^3

S_h : تنش هیدرواستاتیک Pa

A, B, C: ضرایب مدل

ضرایب A, B و C مربوط به خاک مورد مطالعه می باشد و این ضرایب با استفاده از آزمایش سه محوری در آزمایشگاه برای خاک مورد نظر تعیین می شوند، بدین ترتیب که با اعمال سه تنش هیدرواستاتیک مختلف یک دستگاه سه معادله بر حسب A, B و C خواهیم داشت که با حل آن A, B و C بدست می آیند. در مدل مذکور به جای S_h تنش میانگین اندازه گیری شده توسط مبدل، استفاده می گردد. همچنین جرم مخصوص خاک قبل از اعمال تنش مورد نیاز است. بدین ترتیب جرم مخصوص خاک پس از اعمال تنش محاسبه می گردد.

مبدل طراحی شده دارای مزایایی به شرح زیر می باشد:

- منحصر به فرد بودن هسته مرکزی که بر اساس مدل ریاضی بدست آمده است.
- مراحل ساخت این مبدل با توجه به مدلی که از تفلون فشرده ساخته شد، ساده و در مقایسه با مبدل های طراحی و ساخته شده قبلی هزینه کمتری برای ساخت به دنبال خواهد داشت.
- هزینه ساخت یک مبدل بر اساس طرح فوق در سال ۱۳۷۵ کمتر از ششصد هزار ریال می باشد.
- سیستم جمع آوری داده ها و تجزیه و تحلیل اطلاعات با توجه به امکانات موجود متغیر می باشد.
- در راه اجرایی کردن طرح فوق پیشنهادهایی به شرح زیر را می توان مد نظر قرار داد:
- بر اساس مدل ساخته شده از تفلون فشرده مبدلی از جنس آلومینیوم ساخته شود.

- مبدل در ابعاد کوچکتر و بزرگتر ساخته شده و مورد آزمایش قرار گیرد.
- به منظور عدم نفوذ خاک به شیارهای زیر حس کننده های فشار، سطح مبدل با لایه پلاستیکی انعطاف پذیری پوشیده شود.
- برای اندازه گیری دقیقتر تنش های عمودی از عناصر پیزوالکتریک به جای کرنش سنج ها استفاده شود.
- از این مبدل در تحقیقات مربوط به راهسازی و ساختمان می توان استفاده کرد.

منابع مورد استفاده

- شاکری، م. و نخعی، غ.، ۱۳۷۲. مقاومت مصالح پیشرفته و تحلیل تجربی تنش. دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران، ۵۴۱ صفحه.

- Alimardani, R., 1987. A Computer Base Instrumentation System For Measuring Tractor Field Performance. Ph.D. Dissertation, Iowa State University, 134 p.
- Cooper, A. W., Vanden Berg, G.E., Mc colly, H.F. and Erickson, A.E., 1957. Strain Gauge Cell Measures Soil Pressure. Agricultural Engineering: 232-235, 246.
- Harris, W. L., Buchele, W.F. and Malvern, L.E., 1964. Relationship of Mean Stress, Volumetric Strain and Dynamic Loads in soil. Transactions of the ASAE, 7(4): 362 - 363, 369.
- Hovansion, J. D. and Buchele, W.F., 1959. Development of a Recording Volumetric Transducer for Studying Effects of Soil Parameters on Compaction. Transactions of the ASAE: 78-81.
- Nichols, T. A., Bailey, A.C., Johnson, C.E. and Grisso, R.D., 1984. A Stress State Transducer For Soil. ASAE Paper No. 84-1592.
- Mckyes, E., 1985. Soil cutting and tillage. Elsevier, Amsterdam, 217p.
- Nichols, T. A., Bailey, A.C. and Johnson, C.E., 1985. Soil Stress State Determination Under Wheel Loads. ASAE Paper No. 45-1553.
- Raper, R., 1987. Prediction of Soil Compaction Using The Finite Element Method. Ph.D. Dissertation, Iowa state university, 244 p.
- Vanden Berg, G. E., Buchele, W.F. and Malvern, L.E., 1958. Application of Continuum Mechanics to Soil Compaction. Transactions of ASAE, 1(1): 24-27.
- Verma, B. P., Bailey, A.C., Schafer, R.L. and Futral, J.G., 1976. A Pressure Transducer in Soil Compaction study. Transactions of the ASAE, 19(3): 442-447.

Designing of transducer for determination of stress state in soil

F. Merrikh¹, R. Alimardani² and A. Babakhani²

1- Senior Expert, Research Institute of Forests and Rangelands. E-mail: merrikh@rifi-ac.ir

2- Member of Scientific board, University of Tehran.

Abstract

It is a fact that excessive traffic of machines on natural sources and agricultural fields increases soil compaction. The study of soil compaction requires determination of the stress state of soil. A transducer was designed to measure normal pressure in six predetermined directions. The pressure transducer composed of six sensing units and a core. The Data Acquisition System used in this research consists of a data logger, a printer and a recorder. The data collected were used to determine shear stresses which in turn can be utilized for calculation of soil stress state. The change in soil density due to the excessive traffic can be calculated by these data.

Key words: compaction, soil, stress state, transducer.