ارزيابي پتانسيل واگرايي و خصوصيات فيزيکي و مکانيکي خاک رس واگراي تثبيت شده با آهک و پوزولان

سيد محمد علي زمرديان[۱] * و اميرحسين وکيلي[۲]
[۱] استاديار بخش مهندسي آب، دانشگاه شيراز، [۲] کارشناس ارشد مهندسي عمران
(تاريخ دريافت: ۱۳۸۹/۴/۲۹- تاريخ تصويب:۱۳۹۰/۴/۱۵)

چکيده

گستره وسيع خاکهاي واگرا درايران و جهان، پتانسيل زياد احداث سازه هاي آبي در اين مناطق، صدمات وارد به آنها در اثر استفاده ازاين نوع خاکها و همچنين غيراقتصادي بودن جاگزيني منابع قرضه واگرا با منابع غير واگرا، اصلاح خاکهاي واگرا را ضروري مي نمايد. در اين تحقيق با افزودن پوزولان و يا آهک به تنهايي و همچنين افزودن همزمان نسبت هاي ترکيبي پوزولان و آهک به نمونه خاک واگرا، پتانسيل واگرايي با در نظر گرفتن دو متغير زمان عمل آوري و درصد وزني افزودني ها ارزيابي گرديده است. همچنين مکانيزم هاي شيميايي، مکانيکي و فيزيکي خاک ناشي از اين افزودني ها به خاک نيز مورد بررسي قرار گرفتند. نتايج نشان مي دهند که هر چند افزودن آهک يا پوزولان تنها همراه با زمان عمل آوري باعث کاهش پتانسيل واگرايي خاک مي شوند، اما نمونه هاي ساخته شده با ترکيب همزمان آهک و پوزولان داراي مقاومت بيشتري در برابر آبشستگي مي باشند. ضمن آنکه خاک رس واگراي تثبيت شده افزايش مقاومت فشاري، کاهش دامنه خميري، کاهش ميزان سديم آب منفذي و افزايش هدايت الکتريکي از خود نشان مي دهد.

واژه‌هاي کليدي: خاک واگرا، تثبيت و بهسازي، پوزولان، آهک، زمان عمل آوري.

مقدمه

خاک هاي واگرا، خاک هاي رسي هستند که در آبهاي با غلظت پايين نمک به راحتي شسته مي شوند. اين رس ها معمولا داراي مقادير بالايي يون سديم در کاتيون هاي جذبي خود مي باشند. واگرايي، يک پديده پيشرونده مي باشد که از يک نقطه با تمرکز جريان آب شروع شده و به تدريج گسترش مي يابد. نقطه شروع پديده واگرايي مي تواند ترک هاي حاصل از انقباض، نشست نامساوي و يا ترک هاي هيدروليکي باشد. پديده واگرايي و اهميت شناخت آن در طرح هايي نظير سد هاي خاکي و کانال هاي آبرساني که تمرکز فشار آب در داخل خاک وجود دارد، داراي اهميت بسيار زيادي مي باشد. خاک هاي واگرا در انواع مختلف اقليم ها و در مناطق مختلف جهان نظير استراليا، برزيل، ايران و ايالات متحده آمريکا به وفور وجود دارد. خاک هاي واگرا را با آزمايش هاي معمول مکانيک خاک نظير دانه بندي، حدود اتربرگ و ... نمي توان شناخت و معمولا جهت شناسايي اين گونه خاک ها توصيه به انجام همزمان ۴ دسته آزمايش مي شود که عبارتند از آزمايش پين هول، کرامب، هيدرومتري دوگانه و آزمايش هاي شيميايي(ICOLD, 1990). پديده واگرايي داراي ماهيت فيزيکي – شيميايي است که عمدتا از نوع کاني هاي خاک و خصوصيات شيميايي آب منفذي خاک متاثر مي گردد. تجربيات گذشته نشان مي دهند که عمده کاني تشکيل دهنده خاک هاي واگرا مونت موريلونيت ها مي باشند. بر اساس تاثير آب منفذي بر روي رفتار واگرايي خاک، مي توان گفت که هر گاه يک خاک واگرا در معرض آب قرار گيرد، ذرات رس ممکن است از هم جدا گرديده و به صورت معلق درآيند. به همين دليل شکل گيري پديده واگرايي مي تواند باعث شکل گيري پديده پايپينگ در سدهاي خاکي (Sherard et al, 1972; Ingles, 1985)، تخريب جاده ها، کانال هاي آبرساني و پي سازه ها گردد(Ouhadi and Goodarzi, 2006). در گذشته توصيه اکيد بر عدم استفاده از اين نوع خاک ها بود اما امروزه با توجه به گسترش روز افزون ساخت پروژه هاي خاکي و برخورد با اين گونه خاک ها و اقتصادي نبودن جايگزيني منابع قرضه ريزدانه واگرا با منابع قرضه غير واگرا مي توان بر اهميت و ضرورت اصلاح خاک هاي واگرا تاکيد نمود.

پيشينه و ضرورت تحقيق

وقايع و خرابي هاي ناشي از خاک هاي واگرا ابعاد جهاني داشته و به همين دليل تا کنون مطالعات زيادي جهت مقابله با پديده واگرايي انجام گرديده است. در نخستين تلاش ها در سال ۱۹۷۶، با افزودن ژيپس به آب مخزن سد کاردينيا در استراليا مشکل وجود ذرات معلق رس ناشي از واگرايي به نحو مناسبي حل گرديد(Askari and Fakher, 1994).

Haroon et al. (1993) در هندوستان ضمن مطالعه بر روي خاکريزي که از خاک واگرا ساخته شده بود توانستند با افزودن ۲/۵ تا ۳ درصد آهک مشکل واگرايي خاک را کاملا

* پست الکترونيك نويسنده مسئول: mzomorod@shirazu.ac.ir

برطرف نمايند. مبناي مطالعاتي ايشان آزمايش هاي هيدرومتري دوگانه، كرامب و پين هول بود. Bayer and Abden-Nabi (1993) با استفاده از آزمايش پين هول ضمن مطالعه بر روي خاک هاي واگراي چند منطقه مختلف اردن توانستند اين خاک‌ها را كه در طبقه نيمه واگرا قرار داشتند را با افزودن ۲ درصد آهک اصلاح نمايند. Shah and Omar (1998) بر مبناي نتايج به دست آمده از آزمايش‌هاي كرامب و پين هول، تاثير درصدهاي مختلف آهک را بر پتانسيل واگرايي خاک يک پروژه در كاسيميور هندوستان بررسي كردند و با افزودن ۲/۵ درصد آهک توانستند خاک شديداً واگراي مذكور را به خاک غير واگرا تبديل نمايند. Tokta (2001) ضمن استفاده از آزمايش پين هول و مطالعه بر روي خاک قرضه سدي واقع در آنكارا نتيجه گرفت كه از خاكستر بادي نوع C مي توان جهت كاهش پتانسيل واگرايي استفاده نمود. Boloori and Saghafy (2003) با استفاده از ماده آلي پليمري PVA چنين نتيجه گرفتند كه افزودن اين ماده تاثير مثبت قابل توجهي بر خصوصيات خاک واگرا دارد. Ouhadi and Goodarzi (2006) در چارچوب يک پروژه تحقيقاتي به بررسي تاثير سولفات آلومينيوم بر پتانسيل واگرايي خاک پرداختند و دريافتند كه با افزودن ۱/۵ تا ۲ درصد سولفات آلومينيوم مي توان خاک شديدا واگرا را اصلاح نمود.

با توجه به پيشينه تحقيقات انجام گرفته در زمينه واگرايي، آنچه به عنوان خلاء و ضعف مطرح مي باشد عبارتند از:

۱- عدم توجه به لزوم مقايسه بين تثبيت كننده هاي مختلف و بررسي رفتار خاک در مواجهه با تثبيت كننده هاي متفاوت. به همين دليل در تحقيق حاضر در مرحله اول از پوزولان طبيعي و در مرحله دوم از آهک جهت تثبيت خاک واگرا استفاده شده است و رفتار خاک واگرا در مواجهه با اين دو تثبيت كننده بررسي و مقايسه گرديده است. استفاده از پوزولان از آن جهت در دستور كار قرار گرفت كه در برخي مطالعات به تاثير مخرب سولفات ها براي خاک هاي تثبيت شده با آهک اشاره گرديده است. در اثر حمله سولفات ها به خاک شاهد افزايش حجم قابل ملاحظه براي نمونه تثبيت شده و كاهش مقاومت خواهيم بود. افزايش ناهمواري برابر با ۳۰۰ ميلي متر در جاده لاس وگاس به خاطر واكنش بين سولفات ها و آهک در لايه زير اساس يكي از مواردي است كه در ادبيات تخصصي مورد توجه قرار گرفته است. مطابق تحقيقات استفاده از پوزولان ها و يا سيمان ضد سولفات مي توانند به عنوان راهكارهايي جهت رفع اين مشكل باشند (Baiat, 2007; Mallela et al., 2004).

۲- عدم توجه به تاثير پارامتر زمان عمل آوري در فرآيند اصلاحي خاک هاي واگرا. در تثبيت خاک با آهک، مواردي نظير واكنش كربناسيون را مي‌توان به عنوان معايب اين روش بر شمرد. بر اين مبنا تجربيات نا موفقي از تثبيت خاک در آفريقاي جنوبي گزارش شده است كه در آنجا خرابي هاي زيادي ناشي از واكنش كربناسيون به وجود آمده است. مطابق مطالعات محل اصلي خرابي‌هاي ناشي از كربناسيون در مرز بين لايه‌هاي تثبيت شده بوده است زيرا فقط اين قسمت از لايه تثبيت شده در معرض هوا قرار گرفته است (Baiat, 2007; Mallela et al., 2004). عمل‌آوري مناسب مي‌تواند بهترين وسيله براي جلوگيري از واكنش كربناسيون باشد. ضمن آنكه مساله زمان عمل آوري و تغييرات خصوصيات خاک واگرا در بستر زمان مي‌تواند به عنوان نكته‌اي مهم در فرآيند تثبيت مد نظر قرار گيرد.

۳- عدم توجه به لزوم بررسي اثر تركيبي مواد افزودني. به همين دليل در مرحله سوم اين تحقيق جهت تثبيت خاک واگرا از تركيب همزمان آهک و پوزولان به عنوان يک روش جديد استفاده گرديد. مهمترين دليل اين اقدام توجه به مشكلات بيان شده جهت نمونه هاي تثبيت شده با آهک و توجه به اين نكته كه برخي پوزولان ها از جمله پوزولان مصرفي در اين تحقيق، به تنهايي قادر به حل مشكل واگرايي نيست، مي باشد. لذا تركيب پوزولان با آهك به دليل خواص تركيبي بالاي اين دو ماده با هم و با هيدروكسيد سديم موجود در خاكهاي واگرا، اينگونه خاكها را به شكل كاملاً مناسبي تثبيت، اصلاح و قابل استفاده نمود.

۴- توجه كمتر به مكانيزم هاي شيميايي اتفاق افتاده در سير تثبيت شيميايي در مقالات مرتبط و عدم توجه به توصيه به انجام همزمان آزمايش هاي فيزيكي و شيميايي پتانسيل واگرايي(ICOLD, 1990) و انجام قضاوت بر اساس نتايج حاصل از هر دو دسته آزمايش. لذا در اين تحقيق جهت بررسي پتانسيل واگرايي از آزمايش هيدرومتري دوگانه (ASTMD4224-99) و آزمايش پين هول (ASTM D4647-93) و آزمايش‌هاي شيميايي (ASTM D4542-95, D2967-71) استفاده گرديده است. آزمايش هيدرومتري دوگانه جهت ارزيابي اوليه و آزمايش پين هول به دليل دقت در مدل كردن شرايط نشت متمركز مطابق با آنچه در واقعيت اتفاق مي افتد، مورد استفاده قرار گرفتند. علت انجام آزمايش هاي شيميايي توجه به اين واقعيت است كه رفتار خاک هاي واگرا به واسطه وجود كاني‌هاي فعال رسي نظير مونت موريلونيت ها و وجود كاتيون سديم تحت تاثير شاخصه هاي شيميايي قرار مي‌گيرد.

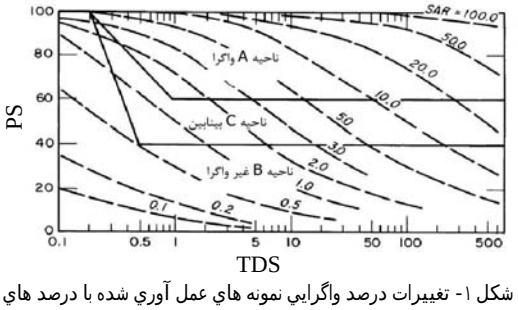
مواد و روش‌ها

خاك رس واگراي مورد استفاده در اين تحقيق از قرضه هاي وسيع خاک هاي واگراي منطقه بوردوزي واقع در كيلومتر ۱۵ جاده تبريز به سمت اهر تهيه گرديد. سپس جهت دسترسي به

نمونه اي با ۱۰۰ درصد واگرایي، یک مدل سازي آزمایشگاهي انجام شد. لذا به نمونه خاک طبیعي اولیه با ۱۰۰ درصد عبوري از الک ۱۰ و ۹۷ درصد عبوري از الک ۲۰۰ درصد هاي مختلف پودر خشک هگزا متا فسفات سدیم که یک ماده پراکنده ساز است، اضافه گردید و نمونه هاي ساخته شده به منظور ایجاد تعادل بین نمک هاي آب منفذي خاک به مدت ۲۴ ساعت با رطوبت بهینه عمل آوري گردیدند. شکل (۱) نتایج آزمایش هیدرومتري دوگانه بر روي نمونه هاي ساخته شده با درصد هاي مختلف هگزا متا فسفات سدیم را نشان مي دهد. روش انجام آزمایش هیدرومتري دوگانه اینگونه است که ابتدا دانه بندي خاک با روش استاندارد آزمایش هیدرومتري، یعني با استفاده از همزن مکانیکي و ماده شیمیایي پراکنده ساز تعیین مي گردد و سپس روي نمونه دیگري از همان خاک، آزمایش هیدرومتري دیگري بدون استفاده از همزن برقي و ماده شیمیایي پراکنده ساز انجام مي شود. درصد ذرات کوچکتر از ۰/۰۰۵ میلي متر در هر دو آزمایش تعیین و سپس درصد واگرایي که برابر با نسبت درصد کوچکتر از ۰/۰۰۵ میلي متر در آزمایش دوم به درصد همین ذرات در آزمایش اول است، محاسبه مي گردد(ASTM D4224-99, D 422-63) شکل (۱) نشان مي دهد که با ا فزودن هگزا متا فسفات سدیم درصد واگرایي افزایش مي یابد به نحوي که نمونه ساخته شده با ۲/۵ درصد هگزا متا فسفات سدیم داراي ۱۰۰ درصد واگرایي مي باشد. همچنین درنمونه هاي ساخته شده با بیش از ۲/۵ درصد هگزا متا فسفات سدیم، کاهش درصد واگرایي رخ مي دهد که در تطابق با مطالعات گذشته است که بیان مي دارد پتانسیل واگرایي در غلظت کمتر الکترولیت اتفاق مي افتد(Ouhadi and Goodarzi , 2006) .

از معیار Sherard et al., (1972) که در تمامي استانداردها پذیرفته شده است، جهت طبقه بندي خاک بر اساس آزمایش هیدرومتري دوگانه استفاده گردید، این معیار بیان مي دارد که نمونه هایي که داراي درصد واگرایي بیش از ۴۰ باشند شدیدا فرسایش پذیر هستند و در صورت آنکه داراي درصد واگرایي کمتر از ۱۵ درصد باشند در رده خاک هاي مقاوم به فرسایش پذیري طبقه بندي مي شوند و نمونه هایي که داراي درصد واگرایي بین ۱۵ تا ۴۰ درصد هستند متوسط واگرا مي باشند.

جهت اطمینان از تکرار پذیري نتایج، نمونه‌هایي با ۲/۵ درصد هگزا متا فسفات سدیم ساخته و پس از ۲۴ ساعت عمل آوري، مورد آزمایش پین هول و آزمایش‌هاي شیمیایي قرار گرفتند. آزمایش پین هول بر اساس روش C ذکر شده در استاندارد ASTM D 4647-93 صورت پذیرفت و طبقه بندي نمونه‌ها بر اساس در نظر گرفتن ۳ معیار شکل و رنگ جریان خروجي، دبي نهایي خروجي جریان و میزان فرسایش سوراخ ایجاد شده در نمونه‌ها و استفاده از جدول (۱) صورت گرفت. بر این مبنا نمونه عمل‌آوري شده با ۲/۵ درصد هگزا متا فسفات سدیم در طبقه D1 که طبقه خاک‌هاي کاملا واگرا مي باشد قرار گرفت.



شکل ۱- تغییرات درصد واگرایي نمونه هاي عمل آوري شده با درصد هاي مختلف هگزا متا فسفات سدیم

جدول ۱- خلاصه ارزیابي نتایج آزمایش پین هول بر اساس آئین نامه **ASTM D4647-93**

قطر سوراخ بعد از آزمایش	میزان کدر بودن آب از بالا	میزان کدر بودن آب از کنار	نرخ نهایي جریان در نمونه (ml/s)	زمان انجام آزمایش (min)	بار آبي (mm)	تقسیم واگرایي	بندي
> 2	خیلي تیره	تیره	۱-۱/۴	۵	۵۰	D1	
>۱/۵	تیره	متوسط تیره	۱-۱/۴	۱۰	۵۰	D2	
<۱/۵	متوسط تیره	تقریباً تیره	۰/۸-۱	۱۰	۵۰	ND4	
>۱/۵	تقریباً تیره	تقریباً شفاف	۱/۴-۲/۷	۵	۱۸۰	ND3	
-	-	-	۱/۸-۳/۲	۵	۳۸۰		
<۱/۵	تقریباً شفاف	تمیز	-	۵	۱۰۲۰	ND2	
۱	کاملا تمیز	کاملا تمیز	-	۵	۱۰۲۰	ND1	

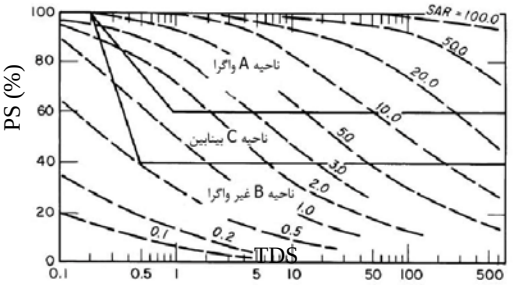
آزمایش هاي شیمیایي این تحقیق بر مبناي استانداردهاي ASTM D4542-95, D2967-71 صورت گرفتند. ابتدا میزان غلظت مهمترین کاتیون ها شامل کلسیم، منیزیم، سدیم و پتاسیم بر حسب میلي اکي والان در لیتر در عصاره اشباع تعیین و سپس نسبت جذب سدیم (SAR)، مجموع کل املاح محلول (TDS) و درصد سدیم (PS) با استفاده از روابط

زیر تعیین گردیدند.

$$SAR=\left[\frac{Na^{+}}{[(Ca^{2+}+Mg^{2+})/2]^{1/2}}\right] \quad (۱)$$

$$TDS = Na + Ca + K + Mg \quad (۲)$$

$$PS = \frac{Na}{TDS}\times 100 \quad (۳)$$



شکل ۲- نمودار طبقه بندي خاک ها
بر اساس معیار شیمیایي شرارد (۱۹۹۱ **Paul,**)

ضمناً مطابق معیار شرارد و همکاران و استفاده از شکل (۲) و در نظر گرفتن پارامترهاي ۳ گانه فوق، اقدام به طبقه بندي خاک گردید.

در این تحقیق و در بخش ارائه نتایج آزمایش هاي شیمیایي و در جهت تحلیل واکنش هاي شیمیایي پارامتر EC خاک که همان ضریب هدایت الکتریکي عصاره اشباع خاک مي باشد، نیز بررسي گردید. هدف از تعیین EC خاك این بود که ارتباط مستقیم با غلظت املاح و کاتیون هاي موجود در خاك داشت و مطابق تحقیقات پیشینیان هرچه غلظت املاح و کاتیون‌ها بیشتر باشد باعث کاهش ضخامت لایه دوگانه و افزایش نیروي جاذبه مي گردد. لذا این پارامتر به نحوي مناسب مي تواند این نوع رفتار خاك را تبیین کند(Fell et al., 1992). ضمن آنکه مطابق معیارهاي شیمیایي رحیمي- دلفي و دانشمندان آفریقاي جنوبي پارامتر ذکر شده مستقیما در طبقه بندي خاک هاي واگرا تاثیر دارد ; (Rahimi and Delfi, 1993 Bell, and Walker, 2000).

جدول (۲) نتایج آزمایش هاي شیمیایي بر روي نمونه هاي عمل آوري شده با ۲/۵ درصد وزني هگزا متا فسفات سدیم را نشان مي دهد. با توجه به نتایج، نمونه هاي ساخته شده در طبقه خاک هاي کاملا واگرا و شدیدا فرسایش پذیر طبقه بندي مي شوند.

جدول ۲- مشخصات شیمیایي خاک واگراي مورد استفاده

PH	Na^{+} (meq/lit)	K^{+} (meq/lit)	Ca^{2+} (meq/lit)	Mg^{2+} (meq/lit)	EC (ms/cm)	TDS (meq/lit)	SAR	PS%
۸/۵	۱۷۹/۱۶	۱۶/۸۹	۲۱/۲۵	۱۳/۱۵	۲۰/۹	۲۳۰/۴۵	۴۳/۲	۷۷/۸۲

پوزولان مورد استفاده از نوع پوزولان طبیعي مصرفي کارخانه سیمان استهبان (فارس) مي باشد که از منطقه سیرجان که در حدود ۱۸۰ کیلومتري استهبان واقع شده است، تهیه مي‌گردد. مطابق استاندارد ASTM-C618، پوزولان به ماده سیلیسي یا سیلیسي آلومیناتي که به خودي خود ارزش چسبندگي ندارد، اطلاق مي شود. اما به شکل ذرات بسیار ریز و در مجاورت رطوبت در درجه حرارت‌هاي معمولي با هیدروکسید سدیم واکنش شیمیایي داشته و ترکیباتي را بوجود مي آورد که خاصیت سیماني و چسبندگي دارد. پوزولان‌هاي طبیعي نواحي مختلف به دلیل تفاوت در ترکیب‌هاي شیمیایي داراي ویژگي‌هاي متفاوتي مي‌باشند. به نحوي که رفتار یک نمونه خاک در مواجهه با پوزولان‌هاي طبیعي نواحي مختلف مي‌تواند کاملا متفاوت باشد. پوزولان تهیه شده از کارخانه در اندازه دانه‌هاي شن و حتي بزرگ تر بود که باید جهت استفاده آسیاب مي‌شد. براي آسیاب کردن پوزولان از دستگاه لس آنجلس استفاد شد. به مدت زمان تقریبي ۲ ساعت پوزولان در دستگاه لس آنجلس آسیاب شد و سپس پوزولان آسیاب شده از الك شماره ۱۰ گذرانده و آماده استفاده شد. لازم به ذکر است که G_S پوزولان مورد استفاده ۲/۶۰ بود که از G_S خاك مورد استفاده که ۲/۷۹ مي باشد، کمتر است. جهت ساخت و عمل آوري نمونه‌ها در طي فرآیند تثبیت، آزمایش تراکم استاندارد مطابق استاندارد ASTM D698-91 بر روي خاک طبیعي انجام پذیرفت و آنگاه تمامي نمونه‌ها با رطوبت بهینه ساخته و عمل آوري گردیدند. درصدهاي اختلاط براي نمونه‌هاي تثبیت شده با پوزولان شامل ۲، ۴، ۵، ۶ و ۸ درصد وزن خشک خاک و زمان‌هاي عمل آوري شامل زمان‌هاي ۱ روزه، ۷ روزه، ۱۴ روزه، ۳۵ روزه و ۹۰ روزه مي‌شد. درصدهاي اختلاط جهت نمونه‌هاي تثبیت شده با آهک شامل ۱، ۲، ۳ و ۴ درصد وزن خشک خاک و زمان‌هاي عمل‌آوري شامل زمان‌هاي ۱ روزه، ۷ روزه، ۱۴ روزه و ۳۵ روزه مي‌باشد. جهت نمونه‌هاي ترکیبي یک بار نمونه هایي با ۱ درصد آهک و درصدهاي مختلف پوزولان و بار دوم نمونه‌هایي با ۱/۵ درصد آهک و درصدهاي مختلف پوزولان در کلیه زمان‌هاي عمل آوري ذکر شده ساخته شدند. ضمناً در این تحقیق مطابق با استاندارد ASTM D 4318-98 تغییرات دامنه

خمیري و مطابق با استاندارد ASTM D 2166-98a تغییرات مقاومت فشاري محصور نشده خاک قبل و بعد از فرآیند تثبیت کنترل گردیدند.

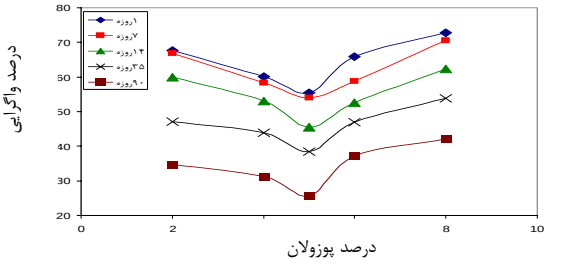
نتایج و بحث

الف- بررسي پتانسیل واگرایي

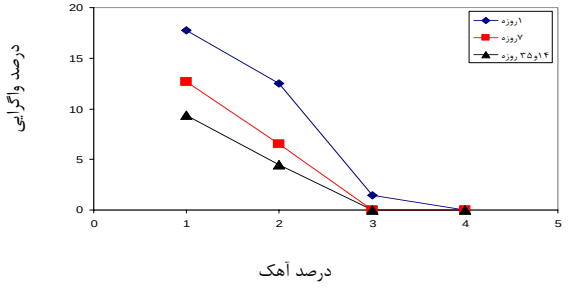
شکل‌هاي (۳)، (۴)، (۵) و (۶) تغییرات درصد واگرایي نمونه‌هاي تثبیت شده با ترکیب‌هاي جداگانه و همزمان پوزولان و آهک را در زمان‌هاي عمل آوري متفاوت نشان مي‌دهند.

مطابق شکل (۳) با افزودن پوزولان از ۲ به ۵ درصد از میزان واگرایي نمونه‌ها کاسته مي‌شود در حالي که براي افزایش پوزولان از ۵ به ۸ درصد مقداري برگشت در میزان واگرایي مشاهده مي‌گردد. با افزایش زمان عمل‌آوري نیز از میزان واگرایي نمونه ها کاسته مي‌شود.

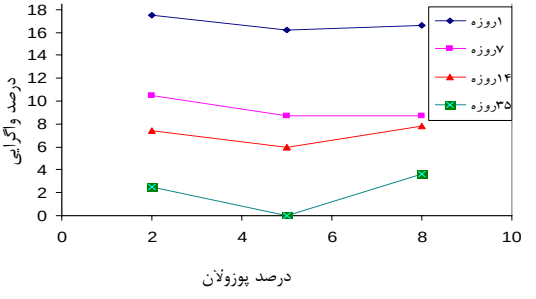
کاملاً مشخص است که نمونه تثبیت شده با ۵ درصد پوزولان و در زمان عمل آوري ۹۰ روزه کمترین مقدار واگرایي نسبت به سایر نمونه‌هاي تثبیت شده را دارا است. درصد واگرایي نمونه ۹۰ روزه مذکور ۲۵/۷۹ درصد به دست آورده شده است که با این تفاسیر خاک را در رده خاک‌هاي نیمه واگرا قرار مي‌دهد. لذا مي‌توان چنین استدلال نمود که پوزولان مصرفي هر چند باعث کاهش پتانسیل واگرایي مي‌شود. اما براي خاک‌هاي با درصدهاي واگرایي زیاد نمي‌تواند به تنهایي خاک را به نمونه‌اي کاملا غیر واگرا تبدیل نماید. همان طور که در شکل (۴) دیده مي شود درصد واگرایي نمونه تثبیت شده با ۴ درصد آهك حتي در زمان عمل آوري يك روزه نیز صفر مي شود. براي نمونه تثبیت شده با ۳ درصد آهك این اتفاق پس از گذشت ۷ روز رخ مي‌دهد. شکل (۴) نشان مي دهد که نتایج نمونه‌هاي تثبیت شده ۱۴ روزه و ۳۵ روزه بسیار به هم نزدیک مي‌باشد. مهمترین نتیجه چنین برداشتي حکایت از کفایت زمان ۱۴ روزه جهت تثبیت نمونه‌ها با آهك را دارد. مطابق شکل‌هاي (۵) و (۶) کاملاً مشخص است که تمامي نمونه‌هاي ترکیبي ساخته شده در رده خاک‌هاي غیر واگرا قرار مي‌گیرند. به ویژه آنکه نتایج نمونه‌هاي ۳۵ روزه حکایت از مناسبتر بودن مقاومت نمونه‌هاي مذکور نسبت به تمامي نمونه‌هاي ساخته شده با ترکیب‌هاي پوزولان یا آهک تنها را دارد.



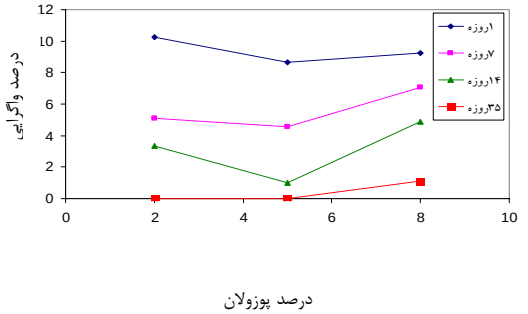
شکل ۳- تغییرات درصد واگرایي نمونه هاي تثبیت شده با درصد هاي مختلف پوزولان



شکل ۴- تغییرات درصد واگرایي نمونه هاي تثبیت شده با درصد هاي مختلف آهک



شکل ۵- تغییرات درصد واگرایي نمونه هاي تثبیت شده با ۱ درصد آهک و درصد هاي مختلف پوزولان



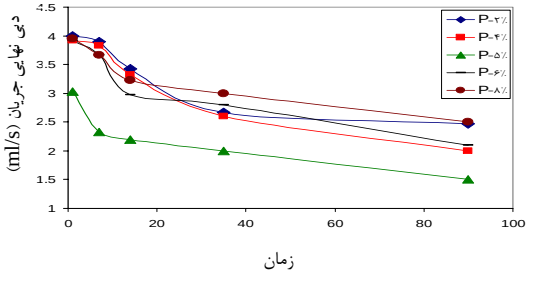
شکل ۶- تغییرات درصد واگرایي نمونه هاي تثبیت شده با ۱/۵ درصد آهک و درصد هاي مختلف پوزولان

بر روي تمامي نمونه‌هاي ساخته شده آزمایش پین هول که مطابق با تحقیقات پیشین(Askari and Fakher, 1994) از متداول‌ترین آزمایش‌هاي تشخیص پتانسیل واگرایي است، انجام گردید. در ارائه نتایج ضمن طبقه‌بندي خاک با در نظر گرفتن

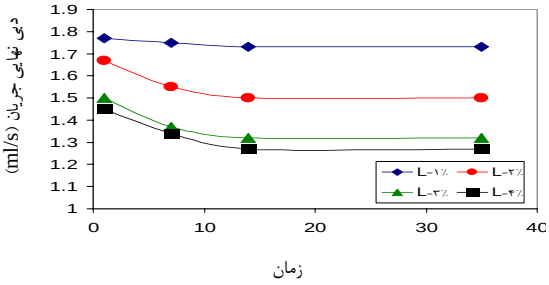
هر ۳ معيار ميزان فرسايش سوراخ، رنگ جريان خروجي و دبي نهايي جريان، در جهت ايجاد يک ديدگاه مقايسه‌اي بين افزودني‌هاي مختلف، نتايج تغييرات دبي خروجي جريان در شرايط ارتفاع هيدروليکي H=۳۸۰ mm آورده شده است. هدف از اين مورد اين است که بعضاً در چندين درصد افزودني، خاک در يک طبقه مشابه قرار مي‌گيرد که در چنين شرايطي و در تشخيص درصد بهينه نياز به دسترسي به پارامترهاي کمي مي‌باشد. شکل هاي (۷)، (۸)، (۹) و (۱۰) تغييرات دبي نهايي نمونه‌هاي تثبيت شده با ترکيب‌هاي جداگانه و همزمان پوزولان و آهک را در زمان‌هاي عمل‌آوري متفاوت نشان مي‌دهند. ضمن آنکه جداول (۳)، (۴) و (۵) طبقه بندي نمونه‌هاي تثبيت شده را مطابق با نتايج آزمايش پين هول نشان مي‌دهند.

مطابق نتايج، با افزايش زمان عمل‌آوري از ميزان دبي خروجي نمونه‌ها کاسته مي‌شود که اين واقعيت نشان دهنده کاهش پتانسيل واگرايي مي‌باشد. تثبيت با پوزولان يک فرآيند زمان بر است. چنانچه شکل (۷) نشان مي‌دهد، فرآيند اصلاح خاک با پوزولان تنها حتي تا ۹۰ روز پس از اصلاح ادامه پيدا مي‌کند. در آزمايش پين هول نيز کمترين واگرايي در تمامي زمان‌هاي عمل‌آوري مربوط به نمونه تثبيت شده با ۵ درصد پوزولان مي‌باشد. از جدول (۳) مشخص مي‌گردد که به جز نمونه تثبيت شده با ۵ درصد پوزولان و در زمان عمل آوري ۹۰ روزه که در طبقه خاک‌هاي غير واگرا قرار مي‌گيرد، ساير نمونه‌ها در رده خاک‌هاي نيمه واگرا و واگرا قرار مي‌گيرند.

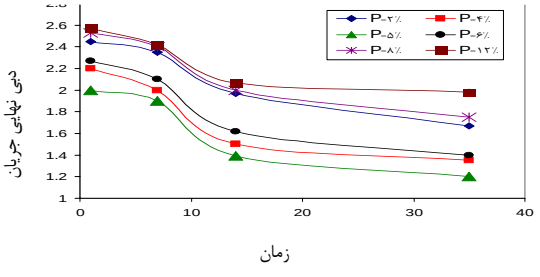
مطابق شکل (۸) آزمايش پين هول براي نمونه‌هاي تثبيت شده با آهک تنها نيز بيان کننده تشابه نسبي نتايج براي نمونه‌هاي ۱۴ روزه با نمونه‌هاي ۳۵ روزه مي‌باشد. ضمن آن که هرچند دبي خروجي با افزايش زمان عمل‌آوري و افزايش درصد آهک کاهش مي‌يابد، اما براي افزايش آهک از ۳ به ۴ درصد تغييرات کمي در دبي خروجي جريان مشاهده مي‌گردد. که حکايت از بهينه بودن افزودن ۳ درصد آهک به خاک با زمان عمل آوري ۱۴ روزه جهت اصلاح واگرايي را دارد. همان طور که از جدول (۴) قابل حصول است به غير از نمونه ۱ روزه تثبيت شده با ۱ درصد آهک ساير نمونه‌ها در رده خاک‌هاي غيرواگرا قرار مي‌گيرند.



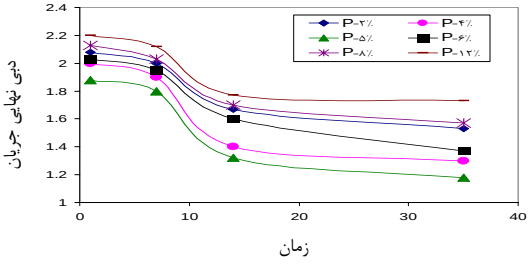
شکل ۷- تغییرات دبي نهايي جريان براي نمونه هاي تثبيت شده با درصد هاي مختلف پوزولان



شکل ۸- تغییرات دبي نهايي جريان براي نمونه هاي تثبيت شده با درصد هاي مختلف آهک



شکل ۹ - تغییرات دبی نهایی جریان برای نمونه های تثبیت شده با ۱ درصد آهک و درصد های مختلف پوزولان



شکل۱۰ - تغییرات دبي نهايي جريان براي نمونه هاي تثبيت شده با ۱/۵ درصد آهک و درصد هاي مختلف پوزولان

جدول ۳- طبقه بندي خاک هاي تثبيت شده با پوزولان بر اساس نتايج ازمايش پين هول

نمونه	۱روزه	۷ روزه	۱۴ روزه	۳۵ روزه	۹۰ روزه
P=2%	D_2	D_2	ND_4	ND_3	ND_3
P=4%	ND_4	ND_4	ND_4	ND_3	ND_3
P=5%	ND_3	ND_3	ND_3	ND_3	ND_2
P=6%	ND_4	ND_4	ND_3	ND_3	ND_3
P=8%	D_2	ND_4	ND_3	ND_3	ND_3

جدول ۴- طبقه بندي خاك هاي تثبیت شده با آهك بر اساس نتایج آزمایش پین هول

نمونه / نمونه	۱روزه	۷ روزه	۱۴ روزه	۳۵ روزه
L=1%	ND_3	ND_2	ND_2	ND_2
L=2%	ND_2	ND_2	ND_2	ND_2
L=3%	ND_2	ND_1	ND_1	ND_1
L=4%	ND_1	ND_1	ND_1	ND_1

جدول ۵- طبقه بندي خاك هاي تثبیت شده با ۱/۵ درصد آهك و درصد هاي مختلف پوزولان بر اساس نتایج آزمایش پین هول

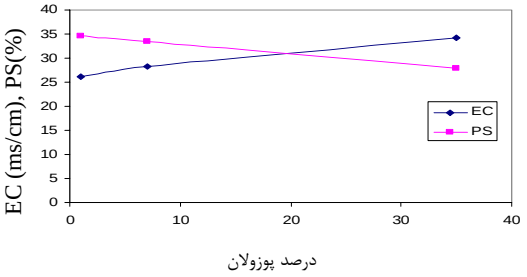
نمونه / نمونه	۱روزه	۷ روزه	۱۴ روزه	۳۵ روزه
P=2%	ND_3	ND_3	ND_2	ND_1
P=4%	ND_3	ND_3	ND_1	ND_1
P=5%	ND_3	ND_3	ND_1	ND_1
P=6%	ND_3	ND_3	ND_2	ND_1
P=8%	ND_3	ND_3	ND_2	ND_2
P=12%	ND_3	ND_3	ND_2	ND_2

مطابق اشكال (۹) و (۱۰) مشخص است كه در حالت اصلاح خاك با تركيب همزمان پوزولان و آهك، هرچند روند تغييرات تا ۳۵ روز پس از اصلاح نيز ادامه دارد اما مهم‌ترين تغييرات در فاصله ۷ تا ۱۴ روز پس از اصلاح اتفاق مي افتد. به نحوي كه ابتدا منحني زمان – دبي خروجي تا زمان عمل آوري ۷ روزه يك شيب ملايم دارد، اما در فاصله ۷ تا ۱۴ روز عمل‌آوري شيب منحني مذكور از نرخ زيادي برخوردار است كه حكايت از كاهش فراوان دبي خروجي در اين فاصله عمل آوري دارد. براي زمان‌هاي بيش از ۱۴ روز نرخ منحني مذكور كاهش مي يابد هرچند روند تغييرات ادامه دارد. در بين تمامي نمونه‌هاي ساخته شده، نمونه تثبيت شده با ۱/۵ درصد آهك و ۵ درصد پوزولان در زمان عمل آوري ۳۵ روزه بهترين نتايج را نشان مي دهد به نحوي كه نتايج ثبت شده براي نمونه ذكر شده حتي بهتر از نمونه‌هاي تثبيت شده با ۳ يا ۴ درصد آهك مي‌باشد.

در جهت تكميل نتايج و تحليل نوع برهمكنش اتفاق افتاده بر روي تعدادي از نمونه‌هاي تثبيت شده آزمايش‌هاي شيميايي انجام گرفت. در آزمايش‌هاي شيميايي ضمن تعيين پارامترهاي SAR، EC، TDS و PS خاك، طبقه خاك طبق معيار شرارد نيز تعيين گرديد. اما در جهت تحليل و مقايسه بين درصدهاي مختلف يک افزودني خاص و يا مقايسه بين افزودني‌هاي مختلف، به صورت خاص تغييرات ۲ پارامتر PS و EC بررسي شدند. EC هدايت الكتريكي خاك است و موید غلظت املاح و كاتيون‌هاي خاك مي‌باشد. هر چه غلظت املاح و كاتيون‌هاي خاك بيشتر باشد احتمال وقوع پديده واگرايي كمتر است (Fell et al., 1992). PS درصد سديم موجود در خاك است و پارامتري است كه رابطه مستقيم با مقدار كاتيون سديم دارد و به طور مستقيم از آن در تعيين پتانسيل واگرايي استفاده مي كنند (Sherard et al., 1976). مطابق روابط موجود هر چه درصد سديم خاكي بيشتر باشد استعداد واگرايي آن خاك نيز بيشتر است. شكل هاي (۱۱)، (۱۲)، (۱۳)، (۱۴)، (۱۵) و (۱۶) تغييرات هدايت الكتريكي و درصد سديم نمونه‌هاي تثبيت شده با تركيب‌هاي جداگانه و همزمان پوزولان و آهک را نشان مي‌دهند.

اصولا افزودن تثبيت كننده‌ها به خاك سبب آغاز چندين واكنش شيميايي مي‌گردد كه از آن جمله مي‌توان به واكنش تبادل يوني، واكنش پوزولاني و هيدراسيون اشاره نمود.

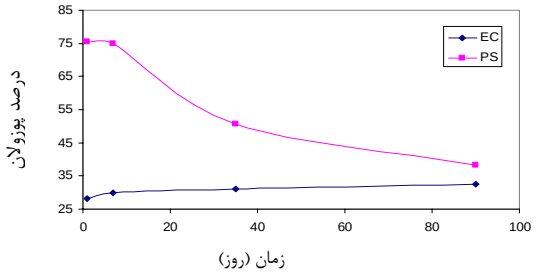
واكنش تبادل يوني در خاك‌هاي ريزدانه با خاصيت تبادل كاتيوني و حضور آب رخ مي‌دهد. بعد از افزايش غلظت يون‌هاي دو ظرفيتي كلسيم و سه ظرفيتي آلومينيوم در اطراف كاني‌هاي رسي، اين يون‌ها جايگزين يون سديم كه به دليل تک ظرفيتي بودن خاصيت الكترونگاتيوي كمتري دارد، مي شوند و ضخامت لايه دوگانه كاهش مي‌يابد و در نتيجه، نيروي جاذبه بين كاني‌ها شدت گرفته و منجر به تماس كاني‌هاي رسي از لبه و از وجوه به يكديگر مي‌شود. واكنش‌هايي كه بين آب، آهک، سيليكات و آلومينات موجود در كاني‌هاي رسي اتفاق مي‌افتد و سبب تشكيل انواع مختلفي از ژل‌هاي چسباننده مي‌گردد را واكنش‌هاي پوزولاني مي‌نامند. واكنش پوزولاني به مرور زمان انجام مي شود و تا زماني كه آهک و پوزولان كلسيم و آلومينيوم كافي جهت اختلاط با سيليكات و آلومينات داشته باشند و PH مخلوط نيز به اندازه كافي بالا باشد تا بتواند حلاليت سيليكات و آلومينات كاني‌هاي رسي را فراهم نمايد ادامه پيدا مي‌كند.



شکل ۱۵- تغییرات هدایت الکتریکي و درصد سدیم نمونه هاي ۳۵ روزه تثبیت شده با ۱/۵ درصد آهک و درصد هاي مختلف پوزولان

محققین معتقدند که کاني‌هاي مونت موریلونیت از توان بالایي جهت واکنش‌هاي پوزولاني برخوردارند که علت آن غلظت بالاي سیلیکات و آلومینات‌هاي موجود در این نوع کاني مي‌باشد (Mallela et al, 2004).

در هماهنگي با نتایج آزمایش‌هاي فیزیکي تشخیص پتانسیل واگرایي، شکل (۱۱) نشان مي‌دهد که نمونه تثبیت شده با ۵ درصد پوزولان داراي بیشترین هدایت الکتریکي و کمترین درصد سدیم مي‌باشد و این نکته موید کمتر بودن پتانسیل واگرایي در این درصد اختلاط است. این موضوع را مي‌توان به کاهش ضخامت لایه دوگانه ارتباط داد. این مساله مي تواند حکایت از انجام واکنش‌هاي تبادل یوني داشته باشد. در اثر جایگزیني کاتیون‌هاي دو یا سه ظرفیتي موجود در پوزولان نظیر Ca^{2+} و Al^{3+} به جاي کاتیون سدیم Na^{+} که تک ظرفیتي بوده و خاص خاک‌هاي واگرا نیز مي‌باشد، ساختار خاک از حالت پراکنده به حالت مجتمع (لخته‌اي) تغییر مي‌کند، در نتیجه نیروي دافعه بین ذرات کاهش و در نهایت با افزایش نیروهاي جاذبه از پتانسیل واگرایي نمونه‌ها کاسته مي‌شود. شکل (۱۲) به بررسي عامل زمان عمل‌آوري در انجام تغییرات شیمیایي در روند تثبیت با پوزولان تنها مي‌پردازد. با افزایش زمان عمل آوري از میزان PS نمونه‌ها کاسته و بر میزان EC آنها افزوده مي شود. پس مي‌توان بیان داشت که واکنش تبادل یوني در بستر زمان انجام مي پذیرد. فرآیند جایگزیني حتي تا ۹۰ روز پس از اصلاح کاملا ادامه مي‌یابد. از لحاظ آزمایش‌هاي شیمیایي فقط نمونه تثبیت شده با ۵ درصد پوزولان در زمان عمل آوري ۹۰ روزه کاملا غیر واگرا تشخیص داده مي شود. مطابق شکل (۱۳) هر چند مقدار EC نمونه تثبیت شده با ۲ درصد آهک از سایر نمونه‌هاي تثبیت شده با آهک تنها بیشتر است اما با توجه به اینکه با افزایش درصد آهک از میزان PS نمونه‌ها کاسته مي‌شود، مي‌توان بیان نمود که با افزایش درصد آهک از میزان پتانسیل واگرایي نمونه‌ها کاسته مي‌شود. علت اینکه EC نمونه تثبیت شده با ۲ درصد آهک بیشتر از سایر نمونه مي‌باشد را

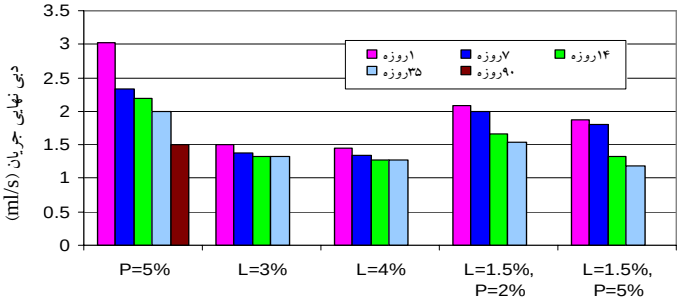


شکل ۱۶- تغییرات هدایت الکتریکي و درصد سدیم نمونه تثبیت شده با ۱/۵ درصد آهک و ۵ درصد پوزولان

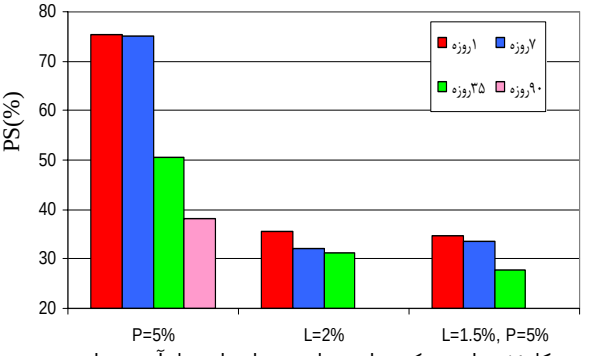
مي‌توان به کامل بودن ظرفیت کاتیوني نمونه خاک در این درصد اختلاط ارتباط داد به نحوي که در درصدهاي اختلاط بیشتر از توانایي خاک براي واکنش تبادل یوني کاسته مي‌شود و به همین دلیل است که نتایج نمونه‌هاي تثبیت شده با ۲، ۳ و ۴ درصد آهک بسیار به هم نزدیک است. نکته مهم قابل ذکر دیگر افزایش EC تمامي نمونه‌هاي تثبیت شده نسبت به نمونه طبیعي مي‌باشد. این اتفاق در اثر افزایش غلظت و ظرفیت کاتیون‌هاي موجود در لایه دوگانه مي‌باشد که منجر به کاهش ضخامت لایه دوگانه مي‌گردد. شکل (۱۴) به بررسي عامل زمان عمل‌آوري در انجام تغییرات شیمیایي در روند تثبیت با آهک تنها مي‌پردازد. با افزایش زمان عمل‌آوري از میزان PS نمونه‌ها کاسته و بر میزان EC آنها افزوده مي‌شود. نکته قابل ذکر دیگر روند بسیار پرشتاب تغییرات براي هر ۲ پارامتر ذکر شده در ۷ روز اول مي‌باشد و پس از گذشت ۷ روز هرچند تغییرات کماکان ادامه دارد اما نرخ بسیار کمي دارد و به ویژه شیب منحني تغییرات از زمان ۱۴ روزه به ۳۵ روزه بسیار کم مي‌شود. این مهم بیان کننده تأثیرات سریع آهك در جهت اصلاح مشکل واگرایي مي‌باشد. نتایج نشان مي‌دهد که براي نمونه ۱ روزه تثبیت شده با دو درصد آهك شاهد کاهش میزان PS خاك از ۷۷/۸۲% به ۳۵/۶۷% بوده که نتیجه چنین امري تغییر نمونه مورد مطالعه از نمونه‌اي کاملاً واگرا و فرسایش پذیر به نمونه‌اي کاملاً غیرواگرا و مقاوم به فرسایش‌پذیري مي‌باشد. مطابق شکل (۱۵) درحالت اصلاح خاک با ترکیب همزمان پوزولان و آهک مقدار EC تمامي نمونه‌هاي ساخته شده نسبت به نمونه طبیعي افزایش مي‌یابد. طبق نتایج تست‌هاي شیمیایي نمونه با درصد اختلاط ۵ پوزولان کمترین مقدار PS و بیشترین مقدار EC را دارد و لذا کمترین پتانسیل واگرایي در این درصد اختلاط ثبت گردیده است هر چند که تمامي نمونه‌هاي ساخته شده در رده خاک‌هاي غیر واگرا طبقه بندي مي‌گردند. شکل (۱۶) نشان مي‌دهد که روند اصلاح خاک با ترکیب پوزولان و آهک تا ۳۵ روز پس از عمل آوري ادامه پیدا مي‌کند. به نحوي که تمامي

نمونه‌هاي ۳۵ روزه از لحاظ مساله واگرايي اصلاح شده اند. لذا مساله زمان عمل آوري جهت نمونه هاي تثبيت شده با پوزولان فاکتوري تعيين کننده است زيرا تغييرات در خصوصيات نمونه‌هاي تثبيت شده با پوزولان بيشتر از آنکه تابعي از تغييرات درصد وزني پوزولان باشد تابعي از زمان عمل‌آوري مي‌باشد. در حالت مقايسه‌اي در اين تحقيق جهت اصلاح مشکل واگرايي به وسيله پوزولان تنها به ۹۰ روز، با آهک تنها به ۱۴ روز و با ترکيب همزمان آهک و پوزولان به ۳۵ روز زمان نياز است.

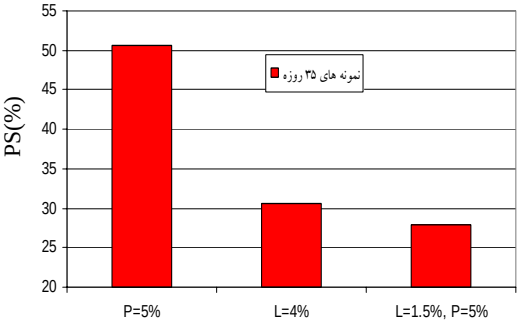
شکل‌هاي (۱۷)، (۱۸) و (۱۹) بر مبناي نتايج آزمايش‌هاي پين هول و شيميايي به مقايسه بهترين و اقتصادي‌ترين نتايج در جهت اصلاح واگرايي مي‌پردازند.



شکل ۱۷- مقايسه ترکيب هاي مختلف در زمان هاي عمل آوري متفاوت بر مبناي نتايج آزمايش پين هول



شکل۱۸- مقايسه ترکيب هاي مختلف در زمان هاي عمل آوري متفاوت بر مبناي نتايج آزمايش شيميايي



شکل۱۹- مقايسه بهترين نمونه هاي ۳۵ روزه بر مبناي نتايج آزمايش شيميايي

در يک مقايسه اجمالي بين نمونه‌هاي مختلف مي‌توان بيان نمود: ۱- درپايان روز اول در بين تمامي نمونه‌هاي ساخته شده نمونه تثبيت شده با ۴ درصد آهک کمترين ميزان واگرايي را نشان مي دهد. اين مهم تبيين کننده تاثيرات سريع آهک در اصلاح واگرايي مي‌باشد. ۲- کمترين واگرايي در بين تمامي نمونه‌هاي ساخته شده در اين تحقيق مربوط به نمونه ۳۵ روزه ساخته شده با ترکيب ۱/۵ درصد آهک و ۵ درصد پوزولان مي‌باشد. اهميت اين مساله زماني بيشتر مي‌گردد که نتيجه نمونه مذکور از تمامي نمونه‌هاي ساخته شده با آهک تنها و پوزولان تنها نيز بهتر مي‌باشد که نتيجه‌اي اقتصادي مي‌باشد. ۳- در حالت کلي آهک در اصلاح واگرايي تاثير گذارتر از پوزولان مي‌باشد به نحوي که حتي نمونه تثبيت شده با ۲ درصد آهک در زمان عمل‌آوري ۱ روزه نمونه را کاملا غير واگرا مي‌کند. در حالي که پوزولان ۵ درصد پس از ۹۰ روز مي‌تواند خاک مورد مطالعه را غير واگرا نمايد.

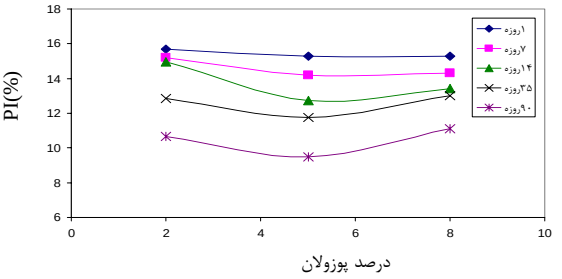
ب- بررسي تغييرات حدود اتربرگ خاک:

جدول (۶) مشخصات حدود اتربرگ نمونه قبل از تثبيت را نشان مي دهد.

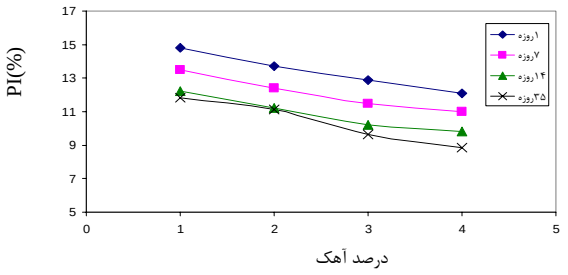
شکل هاي (۲۰)، (۲۱) و (۲۲) تغييرات دامنه خميري نمونه‌هاي تثبيت شده با ترکيب‌هاي جداگانه و همزمان پوزولان و آهک را در زمان‌هاي عمل آوري متفاوت نشان مي‌دهند. با مطالعه در اشکال مذکور مي‌توان بيان داشت که با افزودن جداگانه يا همزمان پوزولان و آهک و افزايش زمان عمل آوري از ميزان دامنه خميري نمونه‌ها نسبت به نمونه قبل از تثبيت کاسته مي شود.

جدول ۶- مشخصات حد رواني و خميري خاك مورد استفاده

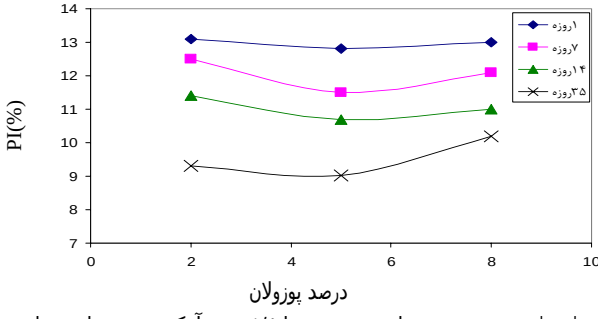
LL	PL	PI
۳۳/۵%	۱۵/۴%	۱۸/۱%



شکل۲۰- تغییرات دامنه خمیري نمونه هاي تثبیت شده با درصد هاي مختلف پوزولان



شکل۲۱ - تغییرات دامنه خمیري نمونه هاي تثبیت شده با درصد هاي مختلف آهک



شکل۲۲ - تغییرات دامنه خمیري نمونه هاي تثبیت شده با ۱/۵ درصد آهک و درصد هاي مختلف پوزولان

در توجیه علل تغییرات کاهشي دامنه خمیري در طي زمان عمل‌آوري و فرآیند تثبیت مي‌توان دلایل زیر را بیان نمود:

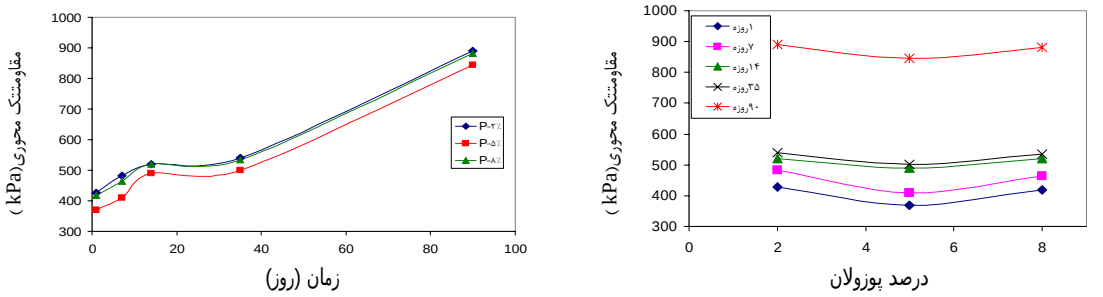
۱- دامنه خمیري تابعي از ضخامت لایه دوگانه مي‌باشد و ضخامت لایه دوگانه خود تابعي از ظرفیت و غلظت کاتیون‌ها مي‌باشد به نحوي که بر اساس مطالعات پیشینیان با افزایش ظرفیت و یا غلظت لایه دوگانه از ضخامت لایه دوگانه کاسته مي‌شود. پس علت اساسي کاهش دامنه خمیري در این تحقیق را مي توان به کاهش ضخامت لایه دوگانه مربوط دانست، زیرا چنانچه در نتایج بخش پتانسل واگرایي دیده شد در طي فرآیند تثبیت و در نتیجه انجام واکنش تبادل کاتیوني از پتانسل واگرایي خاک کاسته مي‌شد که خود این امر نیز در اثر کاهش ضخامت لایه دوگانه مي‌باشد. ۲- دامنه خمیري تابعي از نوع کاني رسي و سطح مخصوص مي‌باشد. مطابق تحقیقات پیشینیان نوع کاني خاک‌هاي واگرا مونت موریلونیت مي‌باشد.

این کاني به دلیل سطح ویژه بزرگي که دارد و به دلیل شبکه بزرگي از بارهاي منفي که حمل مي‌نماید از تواناترین کاني‌هاي رسي در جهت تبادل کاتیوني مي‌باشد. لذا در پي جایگزیني کاتیون‌هاي کلسیم و آلومینیوم به جاي کاتیون سدیم، ساخت خاک از حالت پراکنده که خاص خاک‌هاي واگرا است، به حالت لخته اي (مجتمع) تغییر مي‌نماید و نتیجه تغییر ساخت خاک کاهش دامنه خمیري مي‌باشد. ضمن آنکه در ادبیات تخصصي (Baiat, 2007) آمده است که PI خاک‌هاي حاوي کاني مونت موریلونیت در اثر افزودن مواد کلسیم‌دار به آن در طي گذشت زمان کاهش مي یابد. ۳- دامنه خمیري تابعي از نیروهاي بین ذره‌اي مي‌باشد. افزودن پوزولان و اهک به خاک واگرا سبب تغییر نیروهاي بین ذره‌اي خاک در طي زمان عمل‌آوري مي‌گردد به نحوي که متناسب با تغییر طبقه خاک از حالت واگرا به حالت غیر واگرا، از مقدار نیروهاي دافعه بین ذره‌اي که خاص خاک‌هاي واگرا است کاسته و بر میزان نیروهاي جاذبه بین ذره‌اي افزوده مي‌گردد که نتیجه این امر افزایش مقاومت بین سطوح و کاهش دامنه خمیري مي باشد.

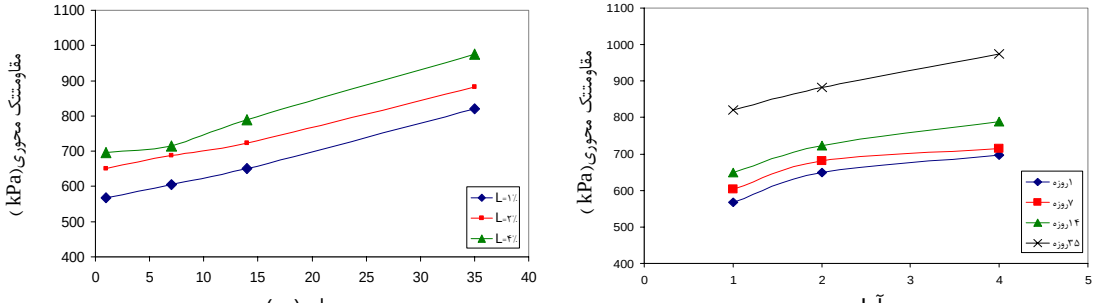
۴- مطابق با اشکال (۲۰) و (۲۲) در بین نمونه‌هاي تثبیت شده با پوزولان تنها و ترکیب همزمان پوزولان و آهک و در تمامي زمان‌هاي عمل آوري کمترین دامنه خمیري مربوط به درصد اختلاط ۵ پوزولان مي‌باشد و مطابق با شکل ۲۱ براي مورد نمونه‌هاي تثبیت شده با آهک تنها این مورد در درصد اختلاط ۴ آهک اتفاق مي‌افتد. علت این اتفاق آن است که کمترین ضخامت لایه دوگانه در این درصدهاي اختلاط اتفاق مي افتد، زیرا مطابق با نتایج، کمترین پتانسیل واگرایي نیز در همین درصدهاي اختلاط ثبت گردید.

ج- بررسي تغییرات مقاومت تک محوري:

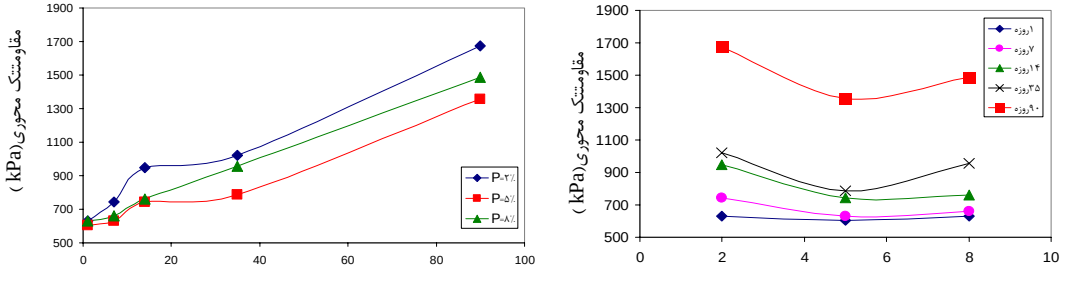
شکل‌هاي (۲۳)، (۲۴)، (۲۵)، (۲۶)، (۲۷) و (۲۸) تغییرات مقاومت تک محوري نمونه‌هاي تثبیت شده با ترکیب‌هاي جداگانه و همزمان پوزولان و آهک را در زمان‌هاي عمل آوري متفاوت نشان مي‌دهند و شکل (۲۹) به مقایسه مقاومت تک محوري ترکیب‌هاي مختلف با در نظر گرفتن توانایي ترکیب‌ها در حل مشکل واگرایي مي پردازد.



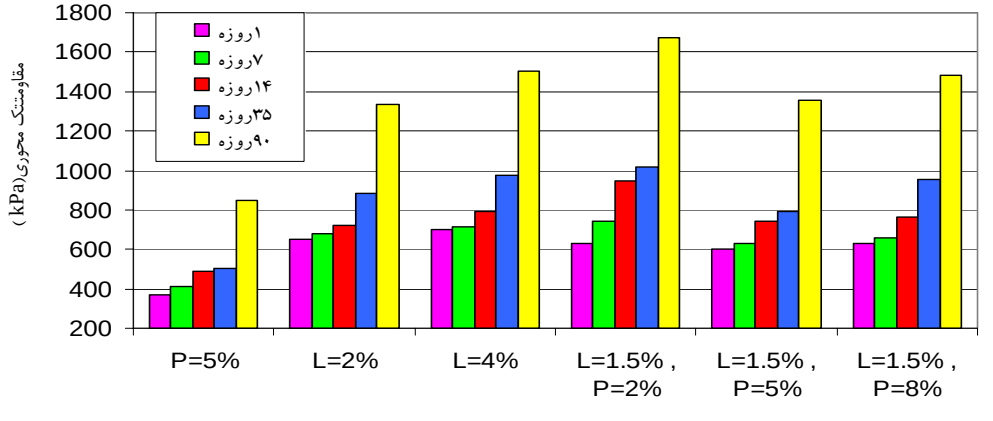
شکل هاي۲۳ و۲۴- تغییرات مقاومت تک محوري نمونه هاي تثبیت شده با درصد هاي مختلف پوزولان



شکل هاي ۲۵ و ۲۶- تغییرات مقاومت تک محوري نمونه هاي تثبیت شده با درصد هاي مختلف آهک



شکل هاي۲۷ و۲۸ - تغییرات مقاومت تک محوري نمونه هاي تثبیت شده با ۱/۵ درصد آهک و درصد هاي مختلف پوزولان



شکل۲۹- مقایسه مقاومت تک محوري ترکیب هاي مختلف

افزايش مقاومت نمونه ها را مي‌توان به انجام واكنش هاي پوزولاني و هيدراسيون ارتباط داد. واكنش هيدراسيون در كوتاه مدت باعث افزايش مقاومت مي‌شود. در حالي كه واكنش پوزولاني سبب افزايش مقاومت و دوام و قابليت باربري خاک در طولاني مدت مي گردد. با بررسي در نتايج به دست آمده مي توان بيان داشت كه با افزايش زمان عمل آوري و افزودن جداگانه يا همزمان پوزولان و آهک مقاومت تک محوري نمونه ها نسبت به نمونه قبل از تثبيت افزايش مي يابد.

چنانچه اشكال (۲۳) و (۲۷) نشان مي‌دهند، در درصد اختلاط ۵ پوزولان خاک مورد مطالعه از مقاومت تک محوري كمتري نسبت به تر بودن ساير درصدهاي اختلاط برخوردار است. علت اين اتفاق مجتمع ساخت خاک در اين درصد اختلاط است زيرا همين نمونه ها نيز از كمترين پتانسيل واگرايي نسبت به ساير نمونه‌ها برخوردار بودند. چنانچه در ادبيات تخصصي آمده است، محصول ساخت مجتمع افزايش تخلخل و كاهش وزن مخصوص مي‌باشد. در بين تمامي نمونه هاي ساخته شده با پوزولان، نمونه تثبيت شده با ۵ درصد پوزولان كه فقط در زمان ۹۰ روزه توانست به صورت نسبي مشكل واگرايي را حل نمايد، از مقاومت تک محوري كمتري برخوردار است. نمونه ۹۰ روزه مذكور سبب افزايش مقاومت تک محوري از 320 kPa به 845 kPa مي گردد. در زمان عمل‌آوري ۱ روزه نمونه تثبيت شده با ۴ درصد آهک با افزايش ۲/۱۸ برابري مقاومت از بيشترين مقاومت تک محوري در بين تمامي نمونه‌هاي ساخته شده برخوردار است كه اين موضوع را مي توان به انجام سريع واكنش هيدراسيون نمونه هاي تثبيت شده با آهک مربوط دانست. در بين نمونه هاي ساخته شده در اين تحقيق، نمونه تثبيت شده با ۱/۵ درصد آهک و ۲ درصد پوزولان از بيشترين مقاومت تک محوري برخوردار است به نحوي كه مقاومت ۳۵ روزه نمونه مذكورkPa ۱۰۲۱ و مقاومت ۹۰ روزه آن kPa ۱۶۷۲ به دست آورده شده است. كه اين مهمترين نتيجه اقتصادي اين تحقيق مي‌باشد، زيرا هر چند نمونه مذكور بهترين تركيب از لحاظ اصلاح واگرايي نيست اما توانست خاک را به نمونه اي كاملا غير واگرا تبديل نمايد. ضمن آنكه نمونه تثبيت شده با ۱/۵ درصد آهک و ۵ درصد پوزولان كه بهترين و مقاوم ترين نمونه از لحاظ كنترل واگرايي در اين تحقيق بود در زمان عمل آوري ۹۰ روزه داراي مقاومت تک محوري kPa ۱۳۵۶ مي باشد كه اين امر به معناي افزايش ۴/۲۴ برابري مقاومت تک محوري خواهد بود.

نتيجه گيري كلي

۱- در اثر اختلاط پوزولان و آهک با خاك رس، واكنش تبادل يوني بين يون هاي كلسيم و آلومينيوم و كاتيون هاي خاك رس صورت مي گيرد و يون كلسيم و آلومينيوم جايگزين يون سديم كه داراي ظرفيت كمتري است مي شود كه اين عمل سبب تجمع يون هاي كلسيم و آلومينيوم در اطراف ذرات رس مي گردد. با زياد شدن غلظت الكتروني اطراف ذرات رس، نيروي جاذبه الكتريكي در دانه ها ايجاد شده كه سبب لخته شدن ذرات و ايجاد دانه هاي بزرگ تر مي گردد و اين عمل باعث تغيير ساخت خاك، كاهش پلاستيسيته خاك و كاهش مشكل واگرايي مي گردد.

۲- واكنش پوزولاني به مرور زمان انجام مي شود و شرط لازم براي انجام آن، وجود كاني هاي رسي فعال در خاك است. واكنش پوزولاني تا زماني كه كلسيم و آلومينيوم كافي در مواد تثبيت كننده وجود داشته باشد و خاك تثبيت شونده نيز سيليكات و آلومينات قابل حل كافي دارا باشد، ادامه مي يابد.

۳- اضافه نمودن پوزولان و آهک به خاک واگرا، علاوه بر كاهش پتانسيل واگرايي خاک، سبب ايجاد فعل و انفعالات شيميايي در خاک گرديده كه بر رفتار هاي فيزيكي و شيميايي خاک تاثير مي گذارد كه از آن جمله مي توان به افزايش مقاومت فشاري خاک، كاهش دامنه خميري خاک، افزايش EC خاک و كاهش PS اشاره نمود.

۴- مي توان با تركيب همزمان آهک و پوزولان و انجام فرآيند عمل آوري مناسب هم مشكل واگرايي را حل نمود و هم مسائل نامطلوبي نظير حمله سولفات ها به خاک و واكنش كربناسيون را كه در اثر اصلاح خاک با آهک تنها اتفاق مي افتد را كنترل نمود.

۵- هر چند افزودن آهک يا پوزولان همراه با زمان عمل آوري باعث كاهش پتانسيل واگرايي خاک مي شوند، اما نمونه هاي ساخته شده با تركيب همزمان آهک و پوزولان داراي مقاومت بيشتري در برابر آبشستگي مي باشند.

REFERENCES

Askari, F. and Fakher, A. (1994). "*Swelling and dispresivity of soil from geotechnical engineering view*." Jahad Daneshgahi, Tehran publication, pp. 245. (In Farsi)

Baiat, A. (2007). "Investigation on effectivence of cement stabilization on fine grain soil." Third national congress on *civil engineering*, Tbriz, Iran (In Farsi)

ASTM, (2000), "Standard Test Method for Dispersive Characteristics of Clay Soil by Double Hydrometer", *ASTM*, Designation: D 4224-99, PP, 518-520.

ASTM, (2000), "Standard Test Method for Identification and Classification of Dispersive Clay Soils by the Pinhole Test", *ASTM*, Designations: D 4647-93, PP, 788-796.

ASTM, (2000), "Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit and Plasticity Index of SOILS", *ASTM*, Designations: D 4318-98, PP, 546-558.

ASTM, (2000), "Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soils", *ASTM*, Designations: D 2166-98a, PP, 191-196.

ASTM, (2000), "Standard Test Method for Pore Water Extraction and Determination of the Soluble Salt Content of Soils by Refractometer", *ASTM*, Designations: D 4542-95, PP, 682-686.

ASTM, (2000), "Standard Test Method for PH of Peat Materials", *ASTM*, Designations: D 2967-71, PP, 311-312.

ASTM, (2000), "Standard Test Method for Particle – Size Analysis of Soils", *ASTM*, Designation: D 422-63, PP, 10-17.

ASTM, (2000), "Standard Test Method for Laboratory Compaction Characteristic of Soil Using Standard Effort (600 kN.m / m^3)", *ASTM*, Designations: D 698-91, PP, 78-85.

Bayer, H. and Abden-Nabi, H. (1993), "*Analysis of dispersive phenomenon of some Jordanian soils*", M. S. thesis.

Bell, F. G. and Walker, D. J. H. (2000), "A Further Examination of the Nature of Dispersive Soils in Natal South Africa", *Quarterly Journal of Engineering and Hydrogeology*, 27 (7), 187-199.

Bolouri-Bazaz, J. and Saghafy, H. R. (2003), "Properties and behavior of dispersive clayey soil treated by PVA", *International Conference on Geotechnical Engineering*, Beirut.

Fell, R., Gregor, J. P. and Stapledon, D. (1992), "Geotechnical Engineering of Embankment Dams", *Rotterdam*, pp.912.

Haroon, M., Shah, S. S. and Khan, S. A. (1993), "Identification and stabilization of the dispersive soil by admixture of lime", Proceedings of *the Second International Seminar on Soil Mechanic and Foundation Engineering of Iran*, pp, 175-186.

ICOLD, (1990), "Dispersive Soils in Embankment Dams", *ICOLD Bulletin* No. 77.

Ingles, O. G. (1985), "Piping in Earth Dams of Dispersive Clay", *ASCE*, Speciality Con, on the Performance of Earth and Earth Supported Stracthures, 3, 111-117.

Jagannath Mallela, Harold Von Quintus, P.E., Kelly L. Smith (2004), " Cosideration of Lime-Stablized Layer In Mechanistic-Empirical Pavement Design " *The National Lime Association,200 North Glebe Road* .Suite 800,Arlington, Virginia 22203.

Ouhadi, V. R. and Goodarzi, A. R. (2006), "Assessment of the Stability of a Dispersive Soil Treated by Alum", *Engineeing Geology*m 85, 91-101.

Paul, C. K. (1991), "Characteristics and Problems of Dispersive Clay Soils", Materials Engineering Branch Research and Laboratory Services Division Denver Office, Colorado, No, R-91-09.

Rahimi, H. and Delfi, M. (1993), "New Chemical Method for Evaluation of Dispersive Soilis", Proceeding of the *Second International Seminar on Soil Mechanics and Foundation Engineering of Iran*, PP, 199-218.

Shah, S. S. and Omar, H. (1998), "A case study of stabilization of dispersive soil using lime", Problematic Soils, Balkema.

Sherard, J. L., Dunnigan, L. P. and Decker, R. S. (1976), "Identification and Nature of Dispersive Soils", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 102, 287-301.

Sherard, J. L., Decker, R. S. and Ryker, N. L. (1972), "Piping in Earth Dams of Dispersive Clay", Proc of Specility Conf on Performance of Earth and Earth Supported Structures, *ASCE*, 1, 584-626.

Tokta, Ferruh. (2001), "*Behavior and Stabilization of Dispersive Soils with C Type Fly Ash*", M. S. Thesis.