

## ارزیابی خطر خوردگی خاک در شهر مشهد

اعظم قزی<sup>۱</sup>، ناصر حافظی مقدس<sup>۲\*</sup>، محمدرضا نیکودل<sup>۳</sup>

پذیرش مقاله: ۸۷/۱۱/۷

دریافت مقاله: ۸۷/۴/۵

### چکیده

یکی از مشکلات شهری آسیب دیدن اجزای بتنی یا فلزی مدفون در خاک نظیر لوله‌های آب، فاضلاب و گاز و پی سازه‌ها، در اثر پدیده خوردگی است. این پدیده تقریباً در همه خاک‌ها وجود دارد و شدت و ضعف آن تابعی از خصوصیات خاک و محیط می‌باشد. در این مقاله پارامترهای مؤثر در پدیده خوردگی خاک معرفی شده و وضعیت خاک سطحی شهر مشهد از نظر عوامل مختلف مؤثر در این پدیده نظیر بافت خاک، اسیدیته، درصد کلر، درصد سولفات و مقاومت ویژه الکتریکی مورد ارزیابی قرار گرفته‌است. بانک داده‌های مورد استفاده شامل اطلاعات بیش از هفتصد گمانه گردآوری شده و نیز نتایج مطالعات ژئوالکتریک که در سطح شهر در خلال پروژه‌های مختلف است می‌باشد. نتایج به دست آمده در این بررسی نشان می‌دهد که بخش عمده شهر مشهد بر روی خاک‌های با خوردگی رده کم تا متوسط قرار دارد و بخش‌های محدودی از شرق، شمال شرق و مرکز شهر دارای خوردگی زیاد است. مناطق با خطر خوردگی بالا عموماً منطبق با مناطق تخلیه خاک و نخاله ساختمانی در حاشیه مسیل‌ها و حاشیه شهر در گذشته می‌باشد.

**کلید واژه‌ها:** خوردگی خاک، شهر مشهد، خصوصیات شیمیایی خاک، بافت خاک

۱. دانشجوی دکتری زمین شناسی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲. دانشیار دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود

۳. استادیار گروه زمین شناسی دانشگاه تربیت مدرس

\* مسئول مکاتبات

## مقدمه

خورندگی خاک نوعی واکنش شیمیایی و الکتروشیمیایی بین خاک و اجسام مدفون در آن می‌باشد که سبب آسیب دیدن فلزات بدون پوشش و اجزای بتنی مدفون در آن می‌گردد. (Jones, 1986; Escalant E., 1957). خاک تحت شرایط خاصی به مثابه یک الکتروولت عمل نموده و جریان دائمی بین خاک و اجزای فلزی نظیر میلگرد و لوله‌های مدفون در آن به وجود می‌آید که در نهایت سبب خوردگی فلزات خواهد شد. خورندگی خاک در نواحی شهری موجب پوسیدگی لوله‌های فلزی آب، گاز، تیرهای چراغ برق، مخازن آب و سوخت زیرزمینی، پی ساختمان‌ها، پوشش بتنی کانال‌ها، جداول حاشیه خیابان‌ها و غیره شده و سالانه هزینه هنگفتی را به جوامع تحمیل می‌کند.

خورندگی فلزات بدون پوشش تابعی از پارامترهایی نظیر رطوبت، بافت خاک، میزان نمک‌های محلول، اسیدیته، مقاومت الکتریکی، میزان دسترسی به اکسیژن، ظرفیت تبادل یونی و فعالیت‌های بیولوژیکی می‌باشد (Ismail and El-Shamy, 2009; Norin, 1998; Levlin, 1992). خورندگی بتن علاوه بر پارامترهای فوق به درصد سولفات سدیم، منیزیم، کلسیم و نیز خصوصیات بتن وابسته است (FHWA<sup>4</sup>, 2000; Tutti, 1982; Sttatful, 1984). به طور کلی پدیده خوردگی فلزات و بتن در همه خاک‌ها وجود دارد ولی شدت و ضعف آن تابعی از شرایط مواد و محیط می‌باشد. نرخ خوردگی فلزات در خاک از ۲۰ میکرون در سال در شرایط مناسب تا ۲۰۰ میکرون در سال یا بیشتر در خاک‌های خیلی خورنده تغییر می‌کند (Douglas & Park, 2003). کنترل خوردگی و نیز تعمیر و اصلاح سازه‌های تحت تأثیر این پدیده بسیار هزینه بر می‌باشد؛ از این رو ارزیابی استعداد خوردگی و دوری از مناطق با خطر بالا اهمیت زیادی در کاهش خسارات این پدیده دارد (Powell et al., 1988; NAOC, 2005). در مقاله حاضر استعداد خوردگی خاک در سطح شهر مشهد براساس نتایج آزمون‌های شیمیایی، مطالعات ژئوالکتریک و خصوصیات بافت خاک مورد ارزیابی قرار گرفته است.

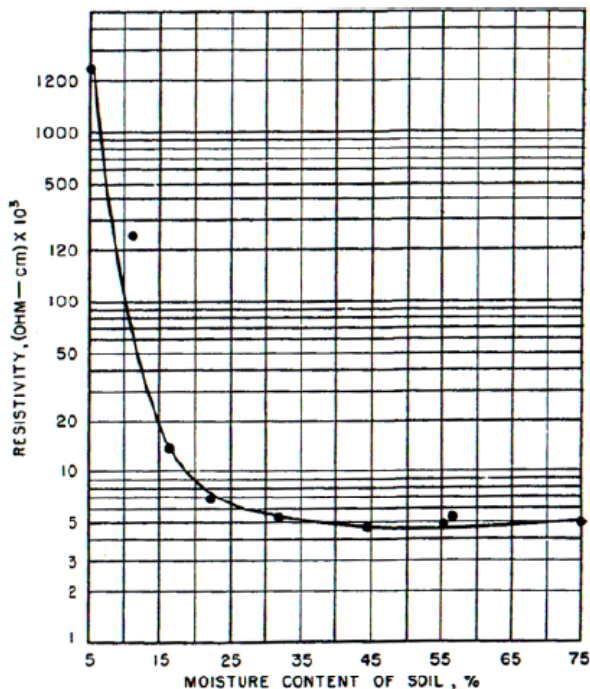
## عوامل مؤثر در خورندگی خاک

**خصوصیات شیمیایی خاک:** خورندگی خاک فرایندی الکتروشیمیایی است، لذا وابستگی زیادی به خواص شیمیایی خاک دارد. ترکیب شیمیایی خاک در هر منطقه تابع شرایط زمین‌شناختی شامل جنس سنگ مادر و نوع فرایند هوازگی و محیط تشکیل می‌باشد. به عنوان مثال خاک‌های حاصل از سنگ‌های دارای کانی پیریت، سولفور می‌باشند؛ در حالی که خاک‌های مربوط به سنگ‌های آهکی و دولومیتی قلیایی دارای PH کمتر از ۸/۵ هستند. خاک‌های بازسازی شده با آهک و سیمان قلیایی می‌توانند PH بالاتر از ۱۲ نیز داشته باشند (Norin, 1998). اثر خصوصیات شیمیایی را با اندازه‌گیری فاکتورهایی نظیر PH، مقاومت الکتریکی و درصد نمک‌های قابل حل بخصوص کلرید و سولفات می‌توان تعیین نمود. وجود نمک‌های قابل حل در آب و نیز یون‌های سدیم، پتاسیم، کلر و غیره سبب افزایش استعداد خوردگی خاک خواهد شد. سولفات سدیم، منیزیم و کلسیم به ترتیب بیشترین خورندگی را در بتن ایجاد می‌کنند. یون سولفات با ترکیبات آبدار سیمان معمولی واکنش ایجاد نموده و سبب شستشوی اجزای سیمان، انبساط آن و در نهایت تخریب بتن می‌گردد. کیفیت بتن و تخلخل آن نیز در این پدیده نقش به سزایی دارد. کلرید و دیگر نمک‌ها در بتن سخت شده، تأثیری ندارد، اما سبب خوردگی اجزای فلزی خواهد شد. تأثیر نمک‌های کلرید و سایر نمک‌ها در خوردگی فلزات به صورت غیرمستقیم می‌باشد. افزایش درصد املاح نمک در خاک مرطوب، هدایت الکتریکی را افزایش داده و سبب خوردگی الکتریکی فلزات می‌گردد (Ismail and El-Shamy, 2009). خاک‌های قرمز، قهوه‌ای و زرد رنگ که دارای اکسید آهن می‌باشند و در شرایط اکسیدان تشکیل شده‌اند، خوردگی کمتری نسبت به خاک‌های خاکستری رنگ مربوط به محیط احیایی دارند.

**درصد رطوبت:** موقعیت سازه‌های مدفون در خاک نسبت به تراز آب زیرزمینی و زون موئینه، پارامتر مهمی در خوردگی خاک محسوب می‌شود. در بالای تراز آب زیرزمینی شرایط زهکشی، رطوبت خاک، میزان دی‌اکسیدکربن و اکسیژن محلول در آب از جمله پارامترهای تعیین کننده در پدیده

4.FHWA: Federal High Way Administration

صورتی که زهکشی نشوند درصد رطوبت بالاتر و خوردگی بیشتری نسبت به سایر خاک‌ها دارند.



شکل ۱ - اثر رطوبت در مقاومت ویژه الکتریکی خاک (Romanoff, 1972)

**مقاومت الکتریکی:** مقاومت الکتریکی نشان‌دهنده استعداد خاک در عبور دادن جریان الکتریکی است. مقاومت الکتریکی پایین بیانگر این است که خاک، مشابه یک الکترولیت خوب عمل کرده و سبب تشدید خوردگی فلزات مدفون می‌شود. مقاومت الکتریکی با افزایش درصد رطوبت و نیز حرارت کاهش می‌یابد (شکل ۱). دو روش معمول تعیین صحرائی مقاومت الکتریکی خاک، روش شلمبرژه<sup>۷</sup> و ونر<sup>۸</sup> است. روش ونر در حالتی که مقاومت الکتریکی خاک اطراف یک لوله جهت طراحی حفاظت کاتدیک مد نظر باشد استفاده می‌شود و روش شلمبرژه جهت ارزیابی متوسط مقاومت در یک پروفیل مشخص به کار می‌رود.

**اسیدیته:** اسیدیته خاک، درجه انحلال‌پذیری مواد خورنده و نیز درجه فعالیت میکروارگانیسم‌ها را کنترل می‌کند. اسیدیته خاک‌های معمولی در محدوده ۵-۸ است. خاک‌های اسیدی ( $PH < 4.5$ ) و نیز خاک‌های بازی ( $PH > 9.1$ ) در گروه

خوردگی می‌باشد. درصد رطوبت خاک تابعی از نوع و درصد کانی‌های رسی و نیز درصد مواد آلی است. به عنوان مثال کانی مونت موریلونیت بیش از ایلیت و این دو کانی بیش از کائولینیت قابلیت نگه‌داشت رطوبت را دارا می‌باشد.

**بافت خاک:** از نظر بافت، خاک‌ها را می‌توان به گروه خاک‌های ریزدانه و درشت‌دانه تقسیم نمود. در خاک‌های درشت‌دانه نظیر شن و ماسه که دارای نفوذپذیری بالا می‌باشند آب به راحتی در خاک جریان می‌یابد و شستشوی خاک به راحتی صورت می‌گیرد و همچنین خاک در شرایط هوایی است. در این خاک‌ها نمک‌های قابل حل کمتر است و هدایت الکتریکی خاک نیز کم می‌باشد. لذا از نظر خوردگی دارای استعداد کمتری هستند. در مقابل خاک‌های ریزدانه به علت درصد رطوبت بالاتر و نمک‌های محلول بیشتر، استعداد خوردگی بیشتری دارند. از سویی کاهش تراوش و ساکن بودن خاک منجر به تمرکز دی‌اکسیدکربن و کاهش اکسیژن محلول در آب خواهد شد و لذا استعداد خوردگی خاک کاهش می‌یابد (Ismail and El-Shamy, 2009). از این رو توصیه می‌شود ظرفیت نگه‌داشت رطوبت خاک‌های پرکننده اطراف لوله‌ها و سازه‌های مدفون کم باشد. معمولاً برای این منظور از شن و ماسه فاقد ذرات بزرگ‌تر از ۳ اینچ که به خوبی متراکم شده‌اند استفاده می‌شود. رومانوف<sup>۵</sup> (۱۹۷۲) براساس مطالعات گسترده‌ای که بر روی خوردگی فلزات مدفون در خاک‌ها انجام داد، بیان نمود که در خاک‌های دست‌نخورده<sup>۶</sup> صرفنظر از بافت خاک به علت اینکه درصد اکسیژن در عمق چندمتری زیر سطح زمین یا در زیر سطح آب بسیار کم می‌باشد، استعداد خوردگی خاک ناچیز خواهد بود. در عوض استعداد خوردگی خاک در بالای سطح آب زیرزمینی و نیز در خاک‌های انتقال یافته بیشتر می‌باشد. معمولاً نرخ خوردگی فلزاتی که چند افق خاک را قطع می‌کنند، بیشتر از حالتی است که تنها با یک لایه تماس دارد (Romanoff, 1972). میزان مواد آلی موجود در خاک نیز از مشخصه‌های دیگر مؤثر در خوردگی است. خاک‌های آلی در

<sup>7</sup> Schlumberger

<sup>8</sup> Wenner

5. Romanoff

6. Undisturbed

## زمین شناسی شهر مشهد

شهر مشهد در حد فاصل بین دو پهنه زمین ساختی کپه داغ در شمال و بینالود در جنوب قرار دارد. در ارتفاعات جنوب مشهد سنگ‌های مافیک و اولترامافیک رخمون یافته‌اند. در سمت غرب و جنوب غرب رخمون‌های سنگ‌های دگرگونی اسلیت و فیلیت وجود دارد. رسوبات بستر شهر مشهد از نظر منشأ شامل الف) نهشته‌های دامنه‌ای (کلوویم)، ب) نهشته‌های دشت سیلابی و ج) نهشته‌های مخروط افکنه‌ای می‌باشد.

نهشته‌های دامنه‌ای به صورت نوار باریکی در حاشیه ارتفاعات شمالی، جنوبی و جنوب غربی وجود دارد. ضخامت این نهشته‌ها حداکثر ۱۵ متر می‌باشد (حافظی مقدس و نیکودل ۱۳۸۵). نهشته‌های مخروط افکنه‌ای در جلوی ارتفاعات و در محل خروجی آبراهه‌ها در غرب و جنوب غرب مشهد تشکیل شده‌اند. نهشته‌های مخروط افکنه‌ای حاشیه ارتفاعات جنوب غربی مشهد و همچنین نهشته‌های شنی و ماسه‌ای کف مسیل‌ها که از فرسایش رخمون‌های دگرگونی اسلیت و فیلیت حاصل شده‌اند، دارای ذرات صفحه‌ای شکل و کشیده می‌باشند. بخش عمده پی شهر مشهد، پوشیده از رسوبات دشت سیلابی است. ضخامت نهشته‌های آبرفتی دشت در حاشیه ارتفاعات کم و به طرف مرکز و شرق افزایش ضخامت می‌یابد. در بخشی از دامنه‌های جنوب غربی شهر در محدوده رضاشهر ضخامت قابل توجهی از خاک‌های گچ‌دار وجود دارد و رگه‌های گچ در سنگ‌های اولترابازیک مشاهده می‌گردد. در شکل ۲ نقشه ساده شده زمین شناسی شهر مشهد و اطراف آن نشان داده شده است.

جدول ۲- مشخصات خاک های غیر خورنده دست‌خورده

(AWWA, C105)

مشخصات خاک‌های غیرخورنده	استاندارد آزمایش	معیار
مقاومت الکتریکی (Ohm-cm)	AASHTO T-288-91	>۳۰۰۰
PH	AASHTO T-289-91	۵-۱۰
سولفات (ppm)	AASHTO T-290-91	<۲۰۰
کلرید (ppm)	AASHTO T-291-91	<۱۰۰
مواد ارگانیک	AASHTO T-267-86	<٪۱

خاک‌های با استعداد خوردگی طبقه‌بندی می‌شوند. خاک‌های اسیدی تأثیر بیشتری در خوردگی فلزات دارند (Ismail and El-Shamy, 2009).

**فعالیت میکروبیولوژیکی:** باکتری‌ها، جلبک‌ها و سایر میکروارگانیسم‌ها نقش مهمی در خوردگی خاک بخصوص در اعماق زیاد دارند. فعالیت بیولوژیکی منجر به تولید اسیدهای آلی و افزایش خوردگی خاک خواهد شد. همچنین رشد ریشه گیاهان منجر به تخریب پوشش حفاظتی فلزات و نیز تخریب بتن شده و شرایط را برای خوردگی لوله و بتن فراهم می‌آورد. از اینرو خطوط لوله و پی‌سازه‌ها باید در زون پایین‌تر از منطقه نفوذ ریشه قرار گیرند (Harris, 1960).

## معیارهای ارزیابی خاک‌های خورنده

معیارهای مختلفی جهت ارزیابی درجه خوردگی خاک ارائه شده است. متداول‌ترین روش بر مبنای مقاومت ویژه الکتریکی می‌باشد. در جدول ۱ طبقه‌بندی استعداد خوردگی خاک بر اساس مقاومت ویژه الکتریکی آمده است.

جدول ۱- طبقه بندی استعداد خوردگی خاک بر اساس

مقاومت ویژه الکتریکی (Romanoff, 1972)

توصیف مقاومت ویژه الکتریکی	محدوده مقاومت ویژه الکتریکی Ohm-cm	استعداد خوردگی
کم	<۲۰۰۰	شدید
متوسط	۲۰۰۰-۱۰۰۰۰	متوسط
زیاد	۱۰۰۰۰-۲۰۰۰۰	کم
خیلی زیاد	> ۲۰۰۰۰	ناچیز

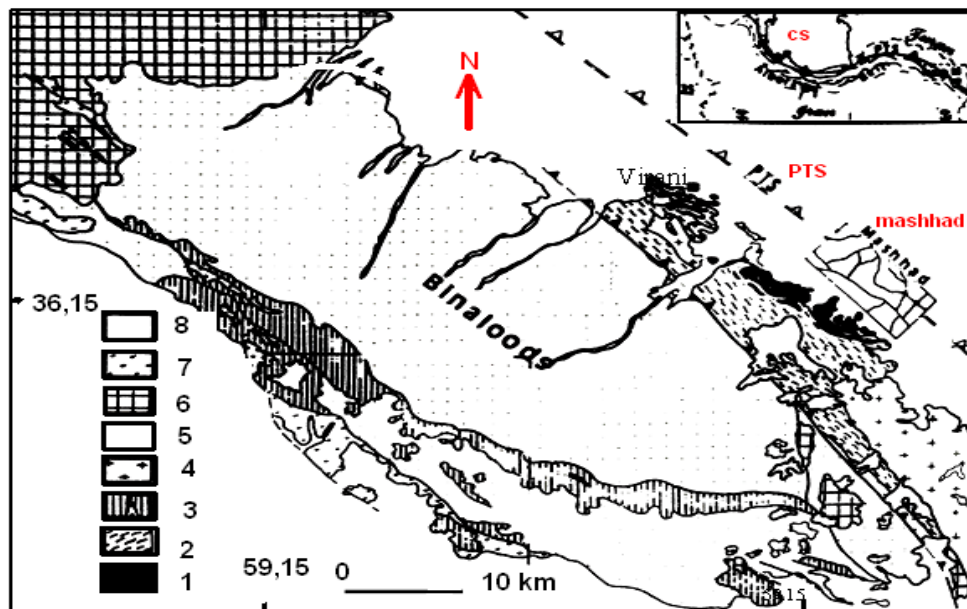
موسسه مطالعات آب آمریکا (AWWA<sup>۹</sup>) معیار ارائه شده در جدول ۲ را برای تفکیک خاک‌های خورنده و غیرخورنده دست‌خورده ارائه نموده است (Romanoff, 1972). کونات (۲۰۰۱)<sup>۱۰</sup> معیارهای ارائه شده در جدول ۳ را به عنوان مناسب‌ترین خاک در اطراف سازه‌های بتنی پیشنهاد نموده است.

9. AWWA: American Water Work Association

10. Conant

جدول ۳- خصوصیات خاک غیر خورنده اطراف سازه‌های بتنی (Counat, 2001)

استاندارد	محدوده مناسب	خصوصیات خاک
ASTM G-51	۶-۸	PH
ASTM D-512	<۲۵۰	یون کلرید (ppm)
ASTM D-516	<۲۰۰	یون سولفات (ppm)



شکل ۲- نقشه خلاصه شده زمین شناسی مشهد در زون بینالود؛ ۱- افیولیت‌های پالئوتتیس ۲- توربیدایت‌های عمیق اقیانوس پالئوتتیس ۳- سنگ‌های آواری و کربناته به همراه نفوذی‌ها و سنگ‌های خروجی مافیک متعلق به پالئوزوئیک ۴- پلوتون‌های گرانیتی و گرانودیوریتی ۵- رسوبات شیلی ماسه سنگی و کنگلومرای دگرگون شده به سن تریاس پسین- ژوراسیک زیرین ۶- سنگ‌های آواری و کربناته ژوراسیک میانی - کرتاسه ۷- سنگ‌های ولکانو کلاستیک آتشفشانی و آهکی پالئوژن ۸- رسوبات نئوژن و کواترنری PTS: خط درز پالئوتتیس CS: دریای خزر M: مشهد (اقتباس از علوی، ۱۹۹۱).

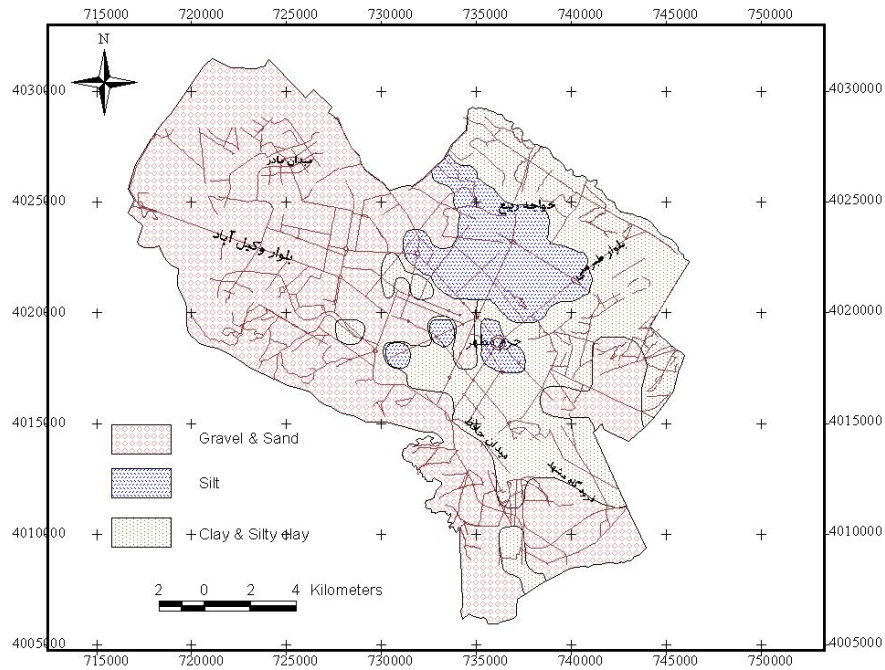
#### خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آبرفت شهر مشهد

بانک اطلاعاتی مورد استفاده در این مطالعه شامل اطلاعات ۷۰۰ گمانه و چاهک اکتشافی است که بخش اعظم داده‌های آن در طی مطالعات ریزبهنه‌بندی لرزه‌ای شهر مشهد از منابع مختلف گردآوری شده است (حافظی مقدس ۱۳۸۵؛ حافظی مقدس و نیکودل ۱۳۸۵). بخشی از اطلاعات نیز مربوط به پروژه تهیه نقشه زمین‌شناسی مهندسی ۱:۲۵۰۰۰ ورقه ۵ مشهد می باشد (شرکت کاوشگران ۱۳۸۵).

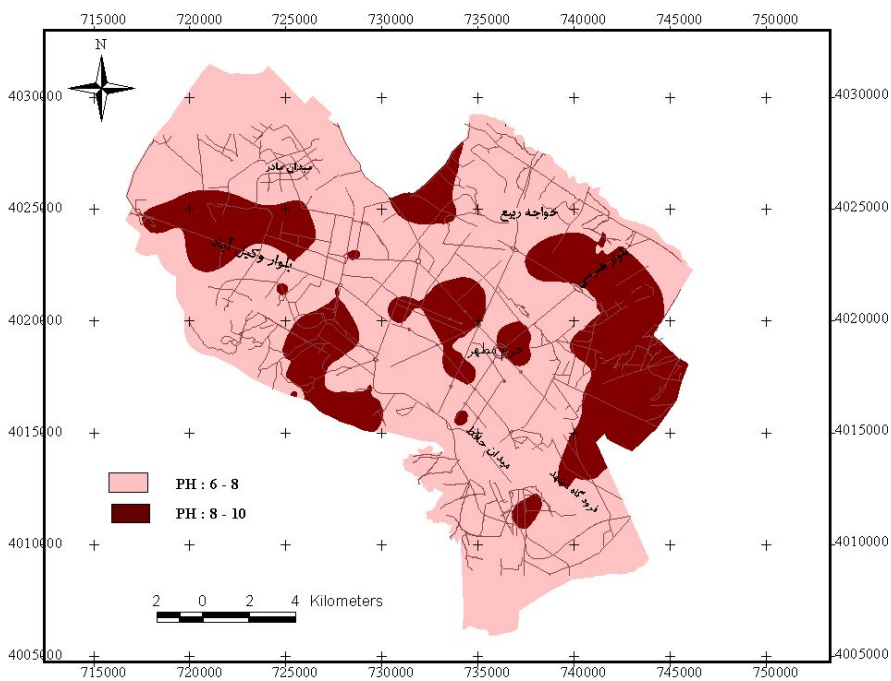
بافت خاک در مشهد: در شکل ۳ شرایط بافت غالب خاک تا عمق ۵ متر در محدوده شهر مشهد نشان داده شده

است (حافظی مقدس ۱۳۸۵). همان‌طور که ملاحظه می‌گردد بافت خاک در غرب و حاشیه ارتفاعات جنوبی و جنوب‌غربی، شن درشت‌دانه با درصد ریزدانه کم می‌باشد که به تدریج به طرف مرکز و شرق به سیلت، سیلت رسی و رس تبدیل می‌گردد.

اسیدپته خاک: اسیدپته خاک در سطح شهر مشهد از حداقل ۶ تا حداکثر ۱۰ تغییر می‌کند. در شکل ۴ نقشه هم اسیدپته خاک در شهر مشهد ترسیم شده است. ملاحظه می‌گردد که بخش عمده‌ای از خاک سطحی اسیدپته بین ۶ تا ۸ دارد.



شکل ۳- نقشه بافت غالب خاک شهر مشهد تا عمق ۵ متری

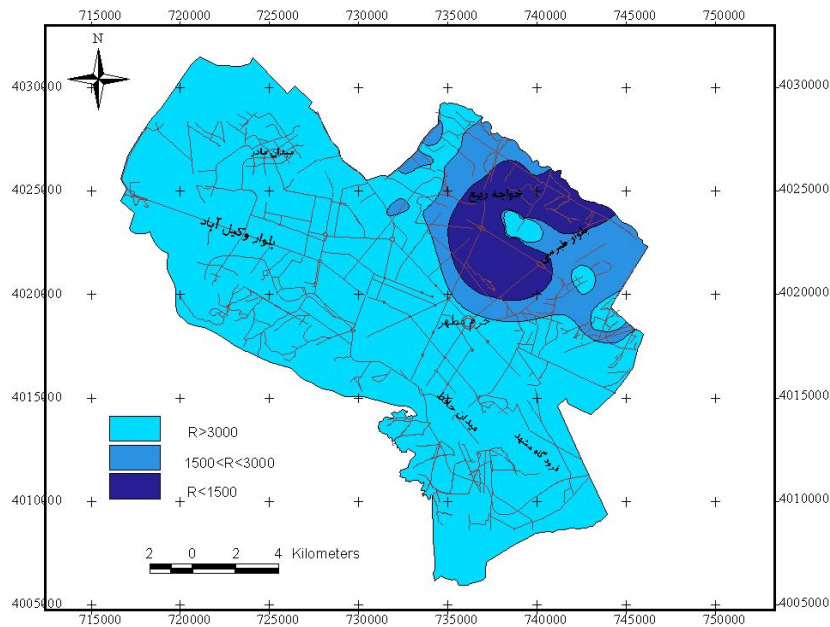


شکل ۴- نقشه هم اسیدیته خاک‌های سطحی شهر مشهد (میانگین تا عمق ۵ متر)

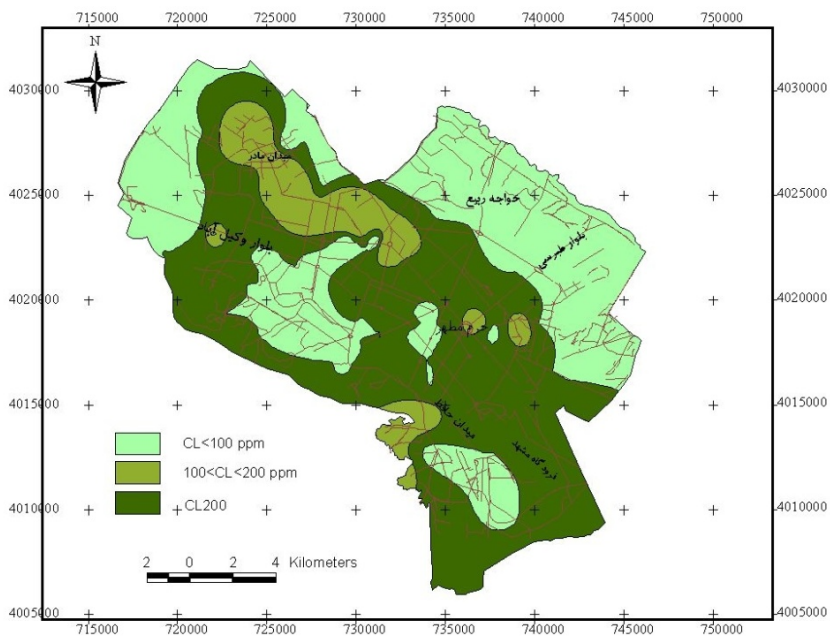
سولفات به علت وجود خاک‌های گچی و رگه‌های گچ در شکستگی بین رخنمون‌های اولترابازیک در جنوب شهر مشهد می‌باشد. از نظر یون کلر نیز بخش مرکزی شهر دارای املاح کلر بیش از ۲۰۰ppm می‌باشد و سایر مناطق کمتر از این میزان است.

میزان کلر و سولفات: در شکل‌های ۷ و ۶ نقشه پهنه‌بندی شهر مشهد براساس میزان سولفات و کلر محلول در خاک است. ملاحظه می‌گردد که در بخش‌های وسیعی از غرب، مرکز و جنوب مشهد میزان یون سولفات محلول در خاک بیش از ۴۰۰PPm می‌باشد. لازم به ذکر است که بالا بودن یون





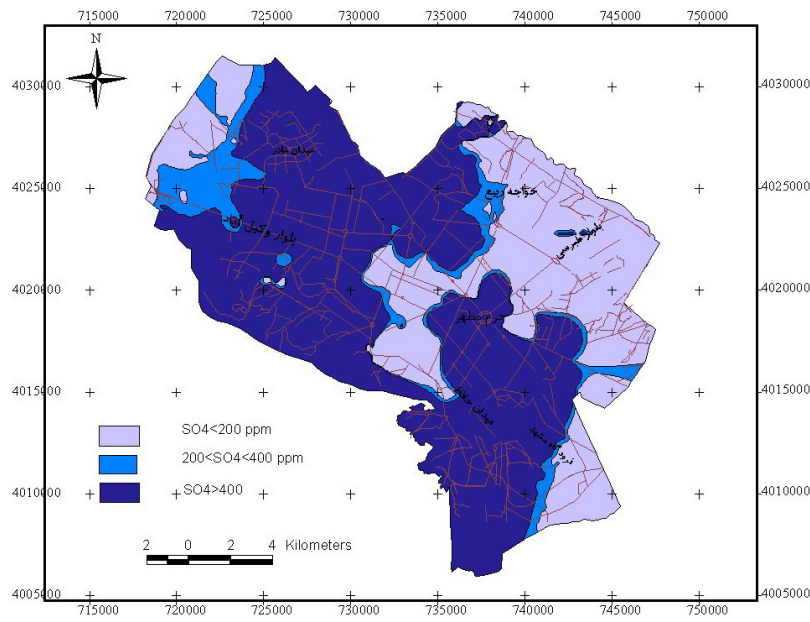
شکل ۵- نقشه هم مقاومت الکتریکی خاک‌های سطحی شهر مشهد (میانگین تا عمق ۵ متر)



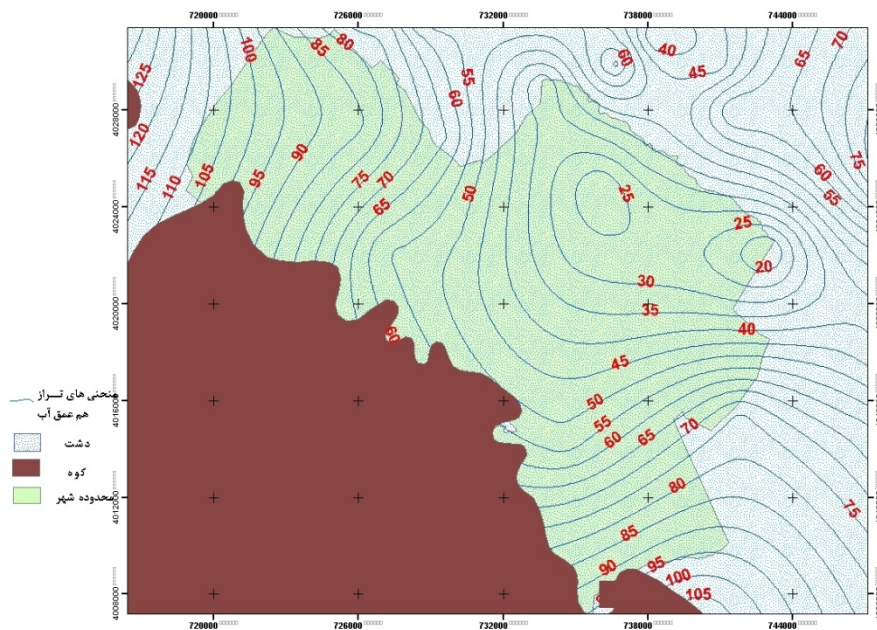
شکل ۶- نقشه هم کلر خاک‌های سطحی شهر مشهد (میانگین تا عمق ۵ متر)

پساب شهری سبب بالا آمدن آب در بخش‌های مرکزی و شرقی شهر شده است. افزایش تراز آب می‌تواند استعداد خوردگی خاک را افزایش دهد. در شکل ۹ میزان بالا آمدگی سطح آب در چاه پیژومتری پارک ملت در شمال غرب شهر نشان داده شده است.

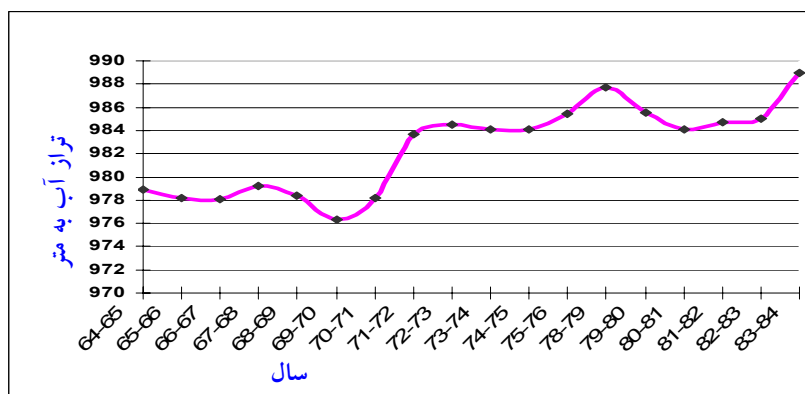
تراز آب زیرزمینی: نقشه هم عمق آب زیرزمینی شهر مشهد براساس اطلاعات ۲۳ پیژومتر واقع شده در محدوده شهری و نواحی اطراف در شکل ۸ ترسیم شده است. حداقل و حداکثر تراز آب زیرزمینی در شهر مشهد ۲۰ و ۱۰۰ متر می‌باشد. جهت جریان آب زیرزمینی در محدوده شهر مشهد از شمال شرق به شمال غرب و جنوب شرق می‌باشد. در سال‌های اخیر، نفوذ



شکل ۷- نقشه هم سولفات خاک‌های سطحی شهر مشهد (میانگین تا عمق ۵ متر)



شکل ۸- تراز آب زیرزمینی شهر مشهد براساس آمار سال ۸۵



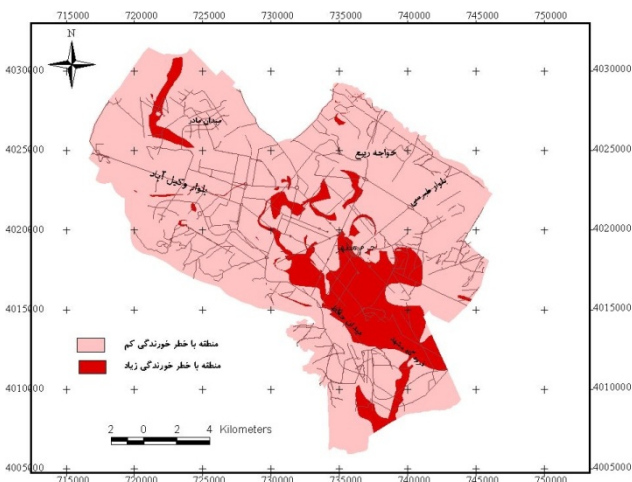
شکل ۹ - تغییرات سطح آب در پیزومتر پارک ملت (واقع در شمال غرب مشهد) در طی سال‌های ۱۳۶۴-۱۳۸۴



سیدی و قلعه خیابان در گذشته محل تخلیه خاک و نخاله ساختمانی بوده است. همچنین با توجه به اینکه مبدأ حرکت آب زیرزمینی شمال شرق می باشد، در این مناطق سطح آب بالاتر بوده و به دلیل حضور پساب شهری خوردگی بیشتری دارد. در محدوده رضاشهر در جنوب شهر مشهد، اگرچه سطح آب پایین می باشد اما به علت حضور خاک های گچ دار استعداد خوردگی خاک زیاد است. در مناطق غربی و حاشیه ارتفاعات جنوب غربی شهر که بافت خاک درشت دانه می باشد، استعداد خوردگی، کم و ناچیز است.

جدول ۴- نحوه امتیاز دهی به پارامترها

پارامتر	شرایط بحرانی
کلر (ppm)	$> 200$
سولفات (ppm)	$> 400$
PH	$6 > PH > 9/5$
مقاومت الکتریکی (اهم-متر)	$< 1500$
بافت خاک	رس و سیلت رسی



شکل ۱۰- نقشه پهنه بندی خوردگی خاک سطحی شهر مشهد

### نتیجه گیری

در این مقاله براساس نتایج مطالعات آزمون های ژئوتکنیکی بیش از ۲۰۰ پروژه عمرانی انجام شده در سطح شهر و همچنین مطالعات ژئوالکتریک پروژه ریزپهنه بندی لرزه ای شهر مشهد، نقشه پهنه بندی خطر خوردگی خاک تهیه شده

### ارزیابی خوردگی خاک در سطح شهر مشهد

براساس مقاومت الکتریکی و مطابق با جدول ۱ و ۲ می توان بیان داشت که خاک سطحی در محدوده ای از شمال و شمال شرق شهر استعداد خوردگی، بخصوص خوردگی فلزات را دارد و در سایر قسمت ها استعداد خوردگی خاک ناچیز است. دلیل اصلی پایین بودن مقاومت الکتریکی خشک بودن خاک است. در شمال شرق شهر که مقاومت الکتریکی کمتر از ۱۵۰۰ اهم- سانتی متر است بافت خاک سیلتی- رسی و سنگ کف آن مارن می باشد. تراز آب در این منطقه حدود ۲۵ متر است اما به علت تراوش پساب شهری رطوبت خاک بالا می باشد. لازم به ذکر است پساب شهری علاوه بر افزایش درصد رطوبت، درصد املاح و اسیدیته خاک را نیز تغییر می دهد و نقش به سزایی در افزایش خوردگی خاک خواهد داشت، لذا افزایش استعداد خوردگی خاک در آینده، دور از انتظار نیست. براساس اسیدیته، بخش هایی که دارای PH بیش از ۸ است، استعداد بیشتری جهت خوردگی دارد. از نظر شرایط زمین شناختی خاک های گچ دار جنوب غرب شهر مشهد و مناطق پوشیده از خاک دستی در حاشیه مسیل ها، اسیدیته و استعداد خوردگی بالا بیشتری دارند. بر اساس جدول ۳ و از نظر معیار سولفات، کلر بخش های وسیعی از شهر مشهد استعداد خوردگی بتن را دارد و بخش هایی از مرکز، شمال و شمال شرق از این نظر بحرانی تر است.

جهت تعیین استعداد عمومی خوردگی در شهر مشهد از همپوشانی ۵ پارامتر درصد سولفات و کلر، اسیدیته، مقاومت الکتریکی و بافت خاک استفاده شده و مناطقی که بیش از دو پارامتر در آنها شرایط بحرانی دارد، به عنوان مناطق با خطر بالا و سایر مناطق در رده خطر کم طبقه بندی شده است (شکل ۱۰). مطابق این نقشه بخش عمده ای از شهر مشهد دارای خطر خوردگی کم است. محدوده های مرکز، شرق و جنوب شرق از جمله محدوده حرم مطهر، فرودگاه و قلعه خیابان و نیز پهنه های باریکی در حاشیه مسیل ها در شمال غرب در پهنه با خوردگی زیاد قرار دارند. بخشی از مناطقی که با خطر خوردگی زیاد در نقشه نشان داده شده، نظیر محدوده

دستی و نخاله ساختمانی، از نظر همه پارامترها در حالت بحرانی قرار دارد و در گروه خاک‌های خورنده طبقه‌بندی می‌شوند. در بخش‌هایی از شهر که آنها خطر خوردگی زیاد است باید در اطراف لوله‌ها و پی سازه‌ها از خاک مناسب یا پوشش مقاوم در برابر خوردگی استفاده شود. لازم به ذکر است که ورود فاضلاب شهری و بالا آمدن تراز آب زیرزمینی در آینده، در نهایت موجب افزایش رطوبت و درصد املاح خاک و تشدید خطر خوردگی در بخش‌های مستعد شهر خواهد شد.

است. نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد که بخش‌های غرب و شمال‌غرب شهر مشهد بجز محدوده‌های کوچکی در حاشیه مسیل‌ها از نظر تمام پارامترها شرایط مناسبی دارند و خوردگی آنها کم است. بخش‌های مرکزی شهر که بافت غالب خاک در آن سیلتی-رسی می‌باشد، از نظر درصد سولفات، کلر و اسیدپته در محدوده متوسط تا زیاد است و در پهنه نسبتاً خورنده طبقه‌بندی می‌شود. بخش‌هایی از مرکز و جنوب‌شرق به علت واقع شدن در حاشیه مسیل‌ها، بالا بودن تراز آب زیرزمینی و زه‌آب شهری و نیز پوشیده بودن با خاک

## منابع

- حافظی مقدس، ناصر. ۱۳۸۵، مطالعات ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای شهر مشهد، گزارش نهایی، سازمان مسکن و شهرسازی خراسان رضوی شرکت مهندسی مشاور کاوشگران. ۱۳۸۶، نقشه زمین شناسی مهندسی ورقه ۵ مشهد
- مقتدر، رضا. ۱۳۸۶، شناسایی گسل شمال مشهد و بررسی سطح آب زیرزمینی شهر مشهد به روش ژئوالکترونیک، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده معدن، دانشگاه صنعتی شاهرود
- حافظی مقدس، ناصر و نیکودل، محمدرضا، ۱۳۸۵. گزارش ژئوتکنیک طرح ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای شهر مشهد، سازمان مسکن و شهرسازی استان خراسان رضوی
- حافظی مقدس، ناصر و آزادی، اصغر، ۱۳۸۵. گزارش ژئوفیزیک طرح ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای شهر مشهد، سازمان مسکن و شهرسازی استان خراسان رضوی
- ASTM -D4318-98, 1998, Standard test methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity index of soil, Annual Books of ASTM Standard, Philadelphia, PA
- Counat P.J. 2001. Corrosion resistance of stainless Steels in soil and concrete, Ceocore, Biarritz.
- Douglas M., & Park C., 2003, Corrosion Guidelines, Version 1.0, California Department of Transportation
- Escalante E., 1957, Concert of underground corrosion, National Bureau of Standard 4- No/579, reprinted by NACE Houston.
- Federal Highway Administration Publication, 2000, No. FHWA-SA-96-072, Corrosion/Degradation of Soil Reinforcement for Mechanically stabilized Earth Walls and Reinforced Slopes.
- Harris, J.O., 1960, Soil micro organisms in relation to catholically protected pipe corrosion, 16, pp. 441-448.
- Ismail, A.I.M and EL-Shamy A. M., 2009, Engineering behavior of soil material on the corrosion of mild steel. Applied Clay Science No. 42, 326-362
- Jones, D.A., 1986, Principles and prevention of corrosion, 2<sup>nd</sup> Ed., Prentice-hall, MC, London.
- Levlin, E., 1992, Corrosion of water pipe systems due to acidification of soil and groundwater. Department of Applied Electro Chemistry and Corrosion Science. Royal Institute of Technology, Stockholm.
- NAOC, 2005, Nigeria Agip Oil Company, Oil Spill Statistics from 1994-2004.
- NCHRP-50, 978, Durability of drainage pipe, TRB, Washington D.C..
- Norin, M., 1998, Groundwater and soil properties in an urban environment and their effects on the corrosion of soil buried constructions of carbon, steel and zinc. Department of Geology. Chalmers University of Technology, Goteborg.
- Powell, C.B., Whyte, S.A., Baranowska-Dutkiewicz, B., Ibiebele, D.D., Isoun, M., Ofoegbu, F.U., 1988, Oshika oil spill environmental impact: effect on aquatic biology. Proceedings of a Seminar on the Petroleum Industry and the Environment of the Niger Delta Held in Port Harcourt, Rivers State, pp. 181-201.
- Romanoff, M., 1972, Corrosion of Steel Pilings in Soil, part of National Bureau of Standards Monograph 127, NBS Papers on Underground Corrosion of Steel Piling 1962-1971. March
- Schaschle, E., Marsh, G.A., 1963, Some new views on soil corrosion. Materials Protection 2, 8-17.
- Starkey, R.L., Wight, K.M., 1983, Anaerobic Corrosion of iron in soil, American Gas Association. Bulletin 17, 11-13.
- Stattful R.F. 1984. Effect on reinforced concrete in Sodium chloride and Sulfate environments, Mater Protect 3(12): 74-80
- Tutti, k. 1982, Corrosion of steel in concrete, Research report 4182, Stockholm, Swedish cement and concrete Research institute