

## ارزیابی خواص مهندسی سنگدانه‌های آهکی بمنظور استفاده در مخلوط بتن (مطالعه موردی: سنگ آهک‌های استان همدان)

غلامرضا خانلری

دانشگاه بوعلی سینا، دانشکده علوم پایه، گروه زمین شناسی

فاطمه ناصری \*

دانشگاه بوعلی سینا، دانشکده علوم پایه، گروه زمین شناسی

لیلا احمدی

دانشگاه بوعلی سینا، دانشکده علوم پایه، گروه زمین شناسی

### چکیده

در این پژوهش سنگ آهک‌های استان همدان شامل سنگ آهک‌های ملایر، سراب‌گیان، همه‌کسی، آبشینه، علیصدر و اکباتان به منظور تولید سنگدانه بتن مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و سایشی سنگ‌های مورد مطالعه با بافت‌های مختلف و نهایتاً دوام‌پذیری سنگدانه‌های آهکی با استفاده از آزمایش سلامت سنگ با محلول‌های سولفات سدیم و منیزیم بررسی شده است. نتایج بدست آمده با استانداردهای مربوط به آزمایش‌های سنگدانه مقایسه گردید و مناسب بودن سنگ‌های مورد مطالعه برای تهیه سنگدانه بتن ارزیابی شد. همچنین در این پژوهش به طور گسترده به بررسی اثر بافت و اندازه ذرات سنگدانه در آزمایش سلامت سنگ پرداخته شده است. بدین منظور سنگ آهک‌های استان همدان بر اساس استاندارد ASTM C88 در ۷ گروه از نظر اندازه ذرات سنگدانه طبقه‌بندی شده‌اند. بر اساس نتایج پتروگرافی، سنگ آهک‌هایی با زمینه میکرایتی نسبت به سنگ آهک‌هایی با سیمان اسپارایتی مقاومت بیشتری در برابر محلول‌های نمکی از خود نشان می‌دهند و میزان درصد افت وزنی در این سنگدانه‌ها کمتر از ۱۰٪ می‌باشد. بعلاوه، سنگدانه‌هایی با بافت بلورین هر چه از نظر اندازه بزرگتر باشند، مقاومت بیشتری در برابر محلول‌های نمکی دارند و ذرات درشت‌تر آنها برای تهیه سنگدانه بتن مناسب‌تر هستند و بالعکس سنگدانه‌های آهکی با بافت ضعیف (نمونه سنگ آهک همه‌کسی) هر چه از نظر اندازه کوچکتر باشند، مقاومت بیشتری دارند و در صورت لزوم امکان استفاده از آنها برای تهیه بتن وجود دارد. همچنین بر اساس نتایج خواص سایشی سنگدانه‌ها، نمونه سنگ آهک آبشینه برای بتن‌هایی که در معرض تنش‌های ضربه ای و سایشی قرار دارند مناسب نمی‌باشد.

واژه‌های کلیدی: سنگدانه آهکی، خواص فیزیکی-مکانیکی، آزمایش سلامت سنگ، محلول‌های سولفات سدیم و منیزیم، پتروگرافی، دانه بندی سنگدانه.

\* نویسنده مسئول: F.naseri91@basu.ac.ir

## ۱- مقدمه

ویژگی‌های سنگ می‌باشد و در کنترل ویژگی‌های فیزیکی مؤثر هستند. به‌علاوه Zarif و Tugrul (۲۰۰۳) اثر بافت سنگ‌های آهکی بر روی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی را بررسی نموده و نتیجه گرفته‌اند که آهک‌های ریزدانه و میکریتی مقاوم‌تر هستند [۸]. لذا در این پژوهش با پیگیری روند افت وزنی سعی شده است تا ارتباط بین بافت سنگ و روند افت وزنی در طی آزمون سلامت سنگ بررسی گردد. همچنین اثر اندازه ذرات سنگدانه و بافت به طور همزمان در این آزمایش در ۶ نمونه بافتی مختلف بررسی شده است. در نهایت با در نظر گرفتن خواص فیزیکی، مکانیکی و سایشی سنگ‌دانه‌ها، مناسب بودن آن‌ها برای تهیه مخلوط بتن با کیفیت‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است.

## ۲- زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

مناطق مورد مطالعه بخشی از استان همدان هستند. گسترش واحدهای سنگ آهک در این استان بسیار زیاد بوده و توسط محققین مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۹] تا [۱۲]. در پژوهش حاضر، ۶ نوع سنگ آهک واقع در شمال شرق، شمال غرب، مرکز، جنوب شرق و جنوب استان مورد بررسی قرار گرفته‌اند که به ترتیب مربوط به شهرستان‌های قهوند (معدن همه‌کسی-Hk)، کبودر آهنگ (منطقه علیصدر-Al)، همدان (مناطق آبشینه-Ab و اکباتان-Ek)، ملایر (منطقه ملایر-Ma)، نهاوند (سراب گیان-Gi) هستند (شکل ۱). بعضی از مناطق مورد مطالعه دارای معادن فعال بوده و مصالح سنگی آن‌ها برای ساخت سازه‌های منطقه به کار رفته‌اند، از جمله نمونه آبشینه که برای ساخت سد خاکی آبشینه استفاده شده است و نمونه سنگ‌دانه از کارخانه دانه‌بندی موجود در منطقه تهیه شده است. نمونه سنگ آهک همه کسی نیز دارای معدن فعال است و از سنگ آهک آن برای مصارف غیر سنگدانه‌ای استفاده می‌شود. به‌علاوه نمونه سنگ آهک ملایر نیز از محل معدن سنگ آهک ملایر برداشت شده است.

## ۳- مواد و روش انجام پژوهش

همان‌طور که پیش از این بیان شد، در این پژوهش ۶ نوع سنگ آهک استان همدان مورد بررسی قرار گرفته است. به‌منظور نمونه برداری از مناطق مورد مطالعه سعی شده است که نمونه‌ها از معادن فعال استان انتخاب شده و رخنمون‌های عاری از هوازدگی مورد

سنگ‌دانه‌ها در صنعت ساخت و ساز به منظور ساخت بتن سیمان پرتلند، بتن آسفالتی، زیرسازی و پوشش راه‌ها و باند فرودگاه‌ها، مصالح پرکننده (پشت دیوارهای حائل و موارد مشابه)، زیرسازی ریل آهن و ساخت پوسته و زهکش در سدهای خاکی ... به کار می‌روند و باید برای عملکرد بهتر در سازه‌ها مقاومت کافی داشته باشند. این مسئله در مورد سنگ‌های آهکی به دلیل گسترش فراوان آن‌ها در سطح زمین به‌ویژه در کشور ما از اهمیت بیشتری برخوردار است. بدین منظور چندین آزمون دوام‌پذیری برای بررسی کیفیت و کمی نمودن مقاومت سنگ‌دانه‌ها ارائه شده است که کاربرد و مقبولیت بعضی بیشتر از سایرین است. مطالعات نشان می‌دهد که در ۵۳ درصد از موارد از آزمایش سلامت سولفات سدیم، ۱۹ درصد از سلامت سولفات منیزیم، ۱۰ درصد آزمایش انجماد و آب شدن و در ۲ درصد از موارد آزمایش شاخص دوام استفاده می‌شود و البته در ۱۶ درصد از موارد نیز به آزمایش سلامت نیاز نیست [۱]. از میان آن‌ها آزمایش‌های سلامت سولفات سدیم و منیزیم کاربرد بیشتری داشته و قادرند مقاومت سنگدانه‌ها در برابر اثرات محیطی مانند عوامل جوی و نیز هجوم نمک‌ها را ارزیابی نماید و به‌عبارت دیگر برای اطمینان از طول عمر مفید در برابر شرایط آب و هوایی نامناسب به کار می‌روند [۲] و [۳]. لازم بذکر است که حداکثر مقادیر افت مجاز در آزمایش‌های سلامت سولفات سدیم و منیزیم به ترتیب بین ۲۵-۵ درصد و ۳۰-۱۰ درصد می‌باشند [۱]. نتایج این آزمایش‌ها تحت تأثیر عوامل بسیاری از جمله شرایط محیطی، خصوصیات محلول و ویژگی‌های سنگ مشا (فاکتورهای زمین‌شناسی) می‌باشند [۴]. Kazi و Al-Mansour (۱۹۸۰)، Smith و Collis (۲۰۰۱) و Tugrul و Korkank (۲۰۰۴) بیان نموده‌اند که فاکتورهای زمین‌شناسی (بافت، ترکیب، شکل ذرات و منافذ) بر تخریب مکانیکی و مقاومت سنگ‌دانه‌ها اثر بسزایی دارند [۵] تا [۷]. همچنین Kazi و Al-Mansour (۱۹۸۰) به بیان اثر عوامل زمین‌شناسی مانند بافت (اندازه ذرات سنگ) و تخلخل پرداخته‌اند و بیان نموده‌اند که سنگ‌هایی با شرایط فیزیکی یکسان به علت این فاکتورهای زمین‌شناسی دارای مقادیر متفاوت افت وزنی در آزمون سلامت سنگ هستند [۵]. آن‌ها نتیجه گرفتند که سنگ‌هایی با اندازه دانه کوچک‌تر و تخلخل یکسان، مقاومت بیشتری در برابر عوامل محیطی نشان می‌دهند. با توجه به نتایج آن‌ها اثر اندازه دانه‌های سنگ بیشتر از

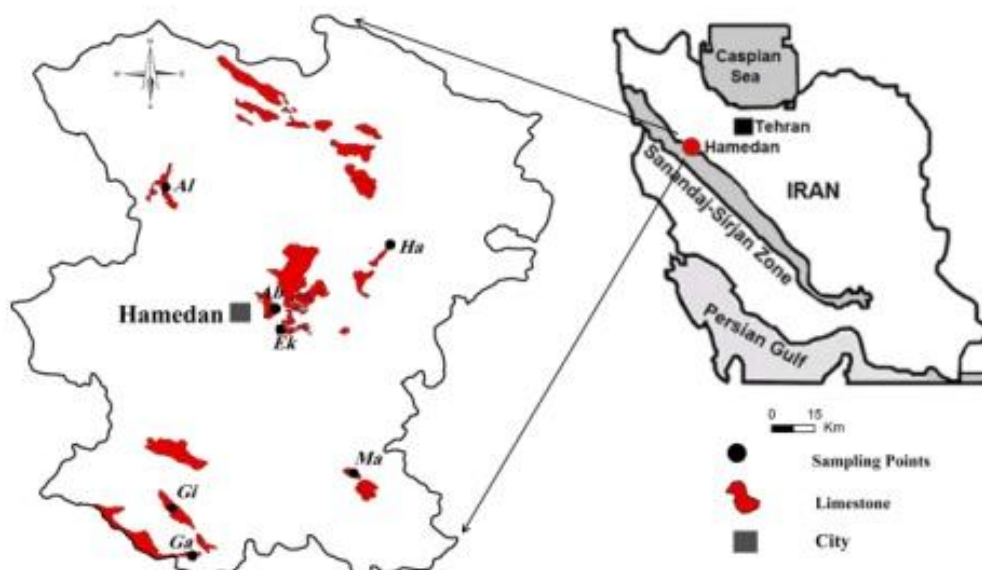
برای سنگدانه‌های درشت دانه قرار می‌آورد ASTM C88 استاندارد گیرند [۱۹]. سپس نمونه‌های سنگدانه تهیه شده، در گرمخانه و در خشک می‌شوند تا به وزن ثابت برسند و وزن اولیه  $105^{\circ}\text{C}$  دمای هر گروه از سنگدانه‌ها به طور مجزا اندازه‌گیری می‌شود. در مرحله بعد، نمونه‌ها در ظروف جداگانه قرار گرفته و در محلول‌های اشباع از سولفات سدیم و منیزیم برای مدت ۱۷ ساعت غوطه‌ور می‌گردند، به گونه‌ای که نمونه‌ها کاملاً توسط محلول پوشیده شوند. پس از خروج نمونه‌ها از محلول، آنها را به مدت ۱۲ ساعت در آب قرار داده تا نمک‌ها شسته شده و در نهایت به مدت ۲۴ ساعت بار دیگر به منظور خشک شدن در گرمخانه قرار گرفته و افت وزنی ذرات سنگدانه پس از هر چرخه غوطه‌وری در محلول‌های اشباع از سولفات سدیم و منیزیم و خشک شدن اندازه‌گیری می‌شود. لازم بذکر است که در حین انجام آزمایش سلامت، پس از انجام برخی از چرخه‌ها، افزایش وزن در نمونه‌ها مشاهده شده است که به همین دلیل شکل‌های ترسیم شده تغییر وزن را مدنظر داشته و همچنین برای نمایش بهتر و بمنظور مقایسه مقادیر افت وزنی، مقادیر ارائه شده به صورت وزن خشک نرمال شده بیان شده‌اند [۳]. این پارامتر بصورت درصد با استفاده از رابطه (۱) تعیین می‌شود:

$$(1) \quad \frac{\text{وزن خشک محاسبه شده در انتهای هر چرخه}}{\text{وزن خشک اولیه}} * 100 = \text{وزن خشک نرمال شده}$$

بررسی قرار گیرند. لازم به ذکر است که در بعضی از مناطق به دلیل نبودن معادن فعال، از ترانسه‌های حاشیه جاده نمونه‌برداری صورت گرفته است. تمامی آزمایش‌ها در آزمایشگاه ژئوتکنیک دانشگاه بوعلی سینا، گروه زمین‌شناسی انجام شده‌اند. آزمایش‌های تعیین خصوصیات فیزیکی سنگ‌های مورد مطالعه شامل چگالی خشک ( $\gamma_d$ )، تخلخل کل ( $n$ )، شاخص جذب آب (QAI) بر اساس استاندارد (ISRM (1981) انجام شده‌اند [۱۳]؛ همچنین آزمایش‌های مکانیکی شامل مقاومت فشاری تک محوره (UCS) بر اساس استاندارد (ISRM (1985)، مقاومت کششی (BTS) بر اساس استاندارد (ISRM (1978) نیز صورت گرفته است [۱۴] و [۱۵]. به منظور بررسی تغییرات کانی‌شناسی و پتروگرافی نمونه‌ها نیز از میکروسکوپ نوری استفاده شده و فراوانی کانی‌ها، فسیل‌ها، بافت و اشکال میکروسکوپی نیز بررسی شده‌اند.

بعد از انجام آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی یاد شده، نمونه‌ها را خرد کرده و آزمایش‌های ارزش ضربه (AIV) و ارزش خردشدگی سنگ‌دانه (ACV) بر اساس استاندارد (BS 812) انجام شده است و همچنین آزمایش ارزش سایش لس آنجلس (LAAV) بر اساس استاندارد (ASTM C131) با دانه‌بندی برای قطعات بزرگ‌تر از ۱۹ میلیمتر بر روی آن‌ها صورت گرفته است [۱۶-۱۸].

در نهایت به منظور انجام آزمایش سلامت سنگ، مصالح مورد آزمایش در هفت گروه مجزا (از نظر اندازه ذرات) بر اساس



شکل ۱- نقشه گسترش سنگ آهک‌های استان همدان و موقعیت نقاط نمونه برداری (Al: علیصدر، Ha: همه‌کسی، Ab: آبشینه، Ek: اکباتان، Ma: ملایر، Gi: سراب گیان)

#### ۴- بحث و نتیجه گیری

##### ۴-۱- بررسی های پتروگرافی

شده است (شکل های ۲ پ و ث). آهک های مناطق علیصدر و ملایر کاملاً متبلور شده و فاقد تخلخل و یا تخلخل کمی دارند (شکل های ۲ ب و ت). همانطور که در جدول ۲ دیده می شود، نمونه سنگ آهک علیصدر دارای بیشترین میزان درصد دولومیت و سنگ آهک های ملایر و سراب گیان به میزان کمتر حاوی دولومیت هستند.

مطالعه کانی شناسی و بافت سنگ های آهکی مورد مطالعه با تهیه مقاطع نازک و رنگ آمیزی مقاطع مذکور توسط محلول آلزایرین قرمز به منظور تشخیص وجود دولومیت در آنها انجام گرفته است. بعلاوه نمونه ها بر اساس طبقه بندی دانهام (۱۹۶۲) و فولک (۱۹۶۲) نام گذاری شده اند (جدول ۱) [۲۰ و ۲۱].

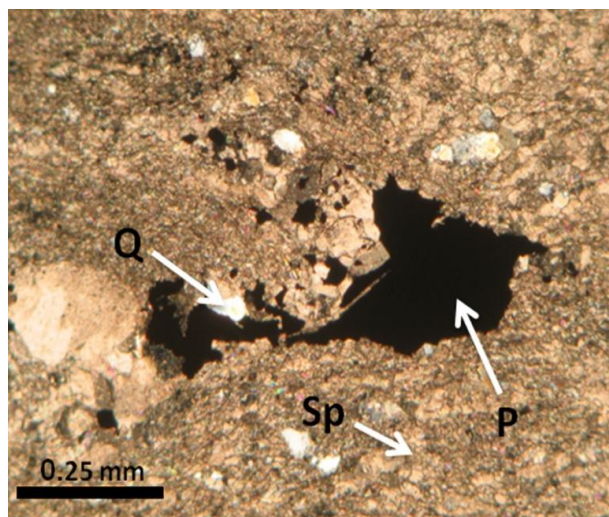
##### ۴-۲- نتایج آزمایش های فیزیکی، مکانیکی و سلامت سنگ

نتایج خواص فیزیکی، مکانیکی و سایشی سنگ های مورد مطالعه شامل چگالی خشک ( $\gamma_d$ )، تخلخل کل ( $n$ )، شاخص جذب آب (QAI)، مقاومت فشاری تک محوره (UCS)، مقاومت کششی برزیلین (BTS)، ارزش سایش س آنجلس (LAAV)، ارزش ضربه (AIV) و ارزش خردشدگی (ACV) سنگ دانه ها در جدول (۲) ارائه شده است. همچنین نتایج مربوط به آزمایش سلامت سنگ در جداول ۴ و ۵ به صورت وزن خشک نرمال شده قرار گرفته است.

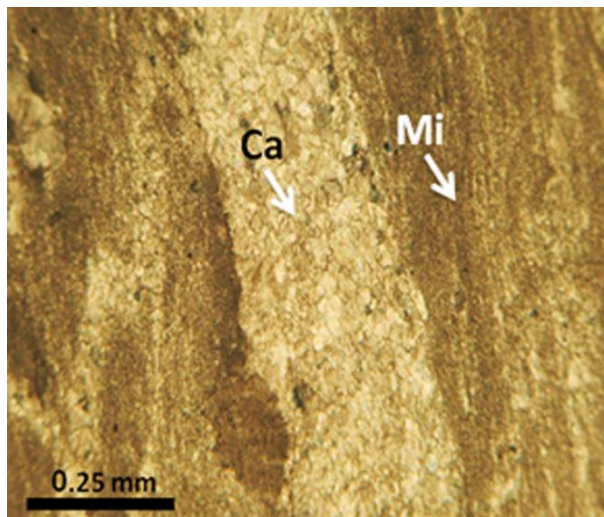
شکل های ۲ (الف) تا (ج) تصاویری از مقاطع میکروسکوپی نمونه های مورد مطالعه را نشان می دهند. نمونه های همه کسی و آبشینه دارای فسیل فراوان هستند. این نمونه ها به دلیل وجود فسیل، بافت های ضعیف تری نسبت به سایر نمونه ها نشان داده اند همچنین از میان این دو نمونه، همه کسی با بافت بایوکلستیک پکستون ضعیف ترین نوع بافت را نشان می دهد. علاوه بر سست بودن بافت های یاد شده، حذف فسیل ها در طی زمان سبب ایجاد تخلخل بیشتر در این نمونه ها

جدول ۱- نتایج بررسی های پتروگرافی

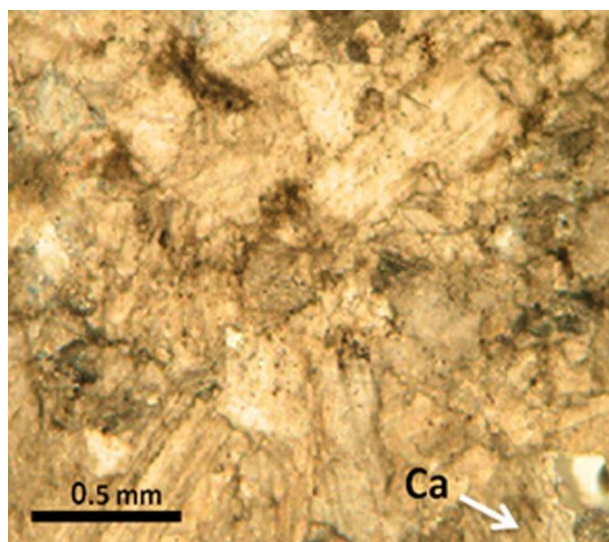
نام نمونه	مشخصات کانی شناسی	درصد و نوع تخلخل	طبقه بندی بافت	نام سنگ	
				روش دانهام	روش فولک
Gi	آهک میکرایتی با مقدار کمی دولومیت و میکا. تبلور مجدد میکرایت ها و تبدیل آنها به بلورهای درشت اسپاری دروغین	۱-۳ درصد و از نوع حفره ای، شکستگی و بین بلوری	آهک آواری	مادستون	میکرایت برشی
Ma	آهک دگرگون شده (بلورهای کلسیت و اسپارایتی دارای جهت یافتگی)، حاوی بلورهای کوارتز، کوارتز پلی کریستالین، چرت و درصد کمی کانی های میکا، پلاژیکلاز و دولومیت	۱-۲ درصد و از نوع حفره ای و بین بلوری	اسپارایت بلورین	آهک	بلورین
Hk	فسیل فراوان (نومولیت، بریوزوآ، قطعات مرجانی، کرینوتید، پلوتید، جلبک های آهکی و فرامینوفر) با سیمان اسپاری	< ۲۰ درصد از نوع حفره ای و درصد کمی از نوع بین بلوری	اسپارایت اسکلتی	بایو کلستیک	اسپارایت
Al	بلورهای درشت کلسیت و دولومیت و درصد کمی بلورهای پلی کریستالین کوارتز	فاقد تخلخل	بلورین	دولستون	دولستون
Ab	قطعات مرجان، بریوزوآ، فرامینوفر، گاستروپود، جلبک قرمز، خرده های دوکفه ای و اکتینودرم، گل میکرایتی و سیمان میکرایتی	۴-۷ درصد و از نوع حفره ای و بین بلوری	میکرایت اسکلتی	ردستون	بایومیکرایت
Ek	میکرایت حاوی شکستگی های فراوان که توسط سیمان کلسیتی پر شده اند.	۱۰ درصد از نوع حفره ای	آهک آواری	میکرایت	کنگلومرای آهکی



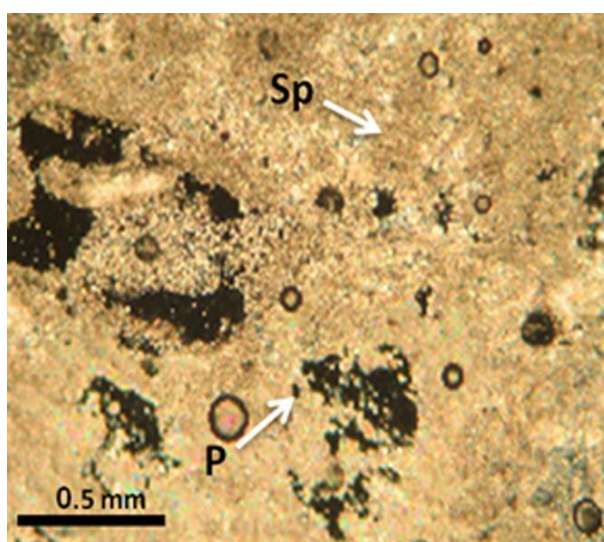
ب



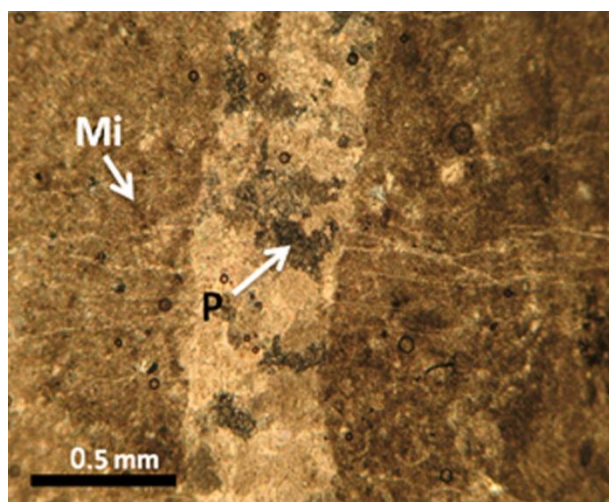
الف



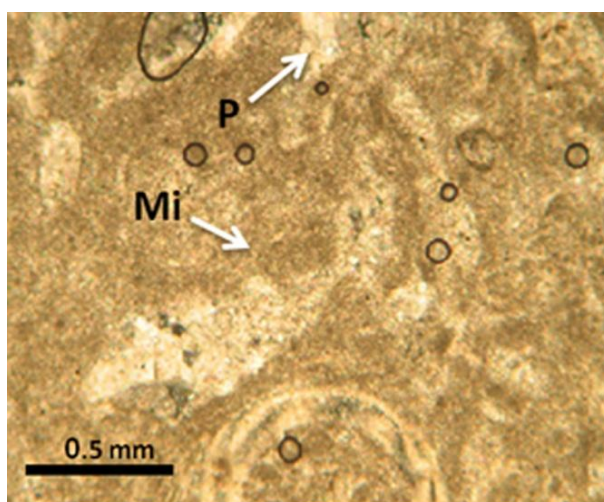
ت



پ



ج



ث

شکل ۲- تصاویر مقاطع نازک نمونه‌های مورد مطالعه: الف) سراب گیان، ب) ملایر، پ) همه کسی، ت) علیصدر، ث) آبشینه، ج) اکباتان (Ca: کلسیت، P: تخلخل، Q: کوارتز، Mi: میکرایت، Sp: اسپرایت)

جدول ۲- ویژگی های فیزیکی و مکانیکی نمونه های مورد مطالعه

نام نمونه	سراب گیان (Gi)	ملایر (Ma)	همه کسی (Hk)	علیصدر (Al)	آبشینه (Ab)	اکباتان (Ek)	پارامترها
n (%)	۰/۸۱	۰/۲۸	۲۱/۷۱	۰/۹۳	۱/۶۸	۰/۹۷	
QAI (%)	۰/۳	۰/۰۹	۱۳/۳۱	۰/۳۲	۱/۴۸	۰/۳۵	
$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	۲/۷۲	۲/۷۲	۱/۸۷	۲/۷۶	۲/۵۸	۲/۷۱	
UCS (MPa)	۴۹/۹	۸۲/۸۸	۱۱/۷۷	۹۲/۸	۶۴	۱۰۸	
BTS (MPa)	۱۵/۶۶	۱۶/۸۴	۳/۲۹	۱۲/۷۷	۷/۹۶	۱۵/۹۶	
LAHV (%)	۲۷/۹	۲۴/۲۷	۵۴/۵۱	۲۲/۲۵	۳۲/۰۸	۲۵/۵۶	
AIV (%)	۸/۷۱	۷/۰۳	۲۶/۱۸	۸/۲۰	۱۱/۶۴	۷/۶۱	
ACV (%)	۱۳/۳۷	۱۰/۳۱	۴۵/۰۱	۱۵/۲۲	۳۱/۴۱	۱۲/۶۰	

جدول ۳- نام گروه و اندازه ذرات سنگدانه

نام گروه	گروه ۱	گروه ۲	گروه ۳	گروه ۴	گروه ۵	گروه ۶	گروه ۷
اندازه ذرات سنگدانه (میلی متر)	۴/۷۵-۹/۵	۹/۵-۱۲/۵	۱۲/۵-۱۹	۱۹-۲۵	۲۵-۳۷/۵	۳۷/۵-۵۰	۵۰-۶۳

رخ می دهد (به استثنای نمونه همه کسی) و در چرخه های بعد از آن تمامی نمونه ها افت وزنی نشان می دهند، که در چرخه پنجم به حداکثر مقدار می رسد. فرآیندی که باعث افزایش یا کاهش وزن در چرخه اول می گردد، بدین نحو قابل توضیح می باشد که در اولین چرخه، محلول نمک به درون ریزترک ها و یا حفرات سنگ نفوذ می کند. در نمونه هایی که درصد تخلخل و جذب آب پایینی دارند و یا تخلخل مفید کمی دارند، فقط حفرات و ترک های سطحی اشباع شده و تبلور نمک در حفرات و ترک های مذکور باعث جدایش ذرات و لایه هایی از سنگ گردیده و افت وزنی در سنگ مشاهده می گردد. این پدیده در نمونه سنگ آهک ملایر با حداقل درصد تخلخل (جدول ۱ و ۲) دیده می شود. اما در نمونه هایی که جذب آب و تخلخل بیشتر و یا تخلخل مفید بیشتری دارند، حفرات و ترک های داخلی نیز اشباع می گردند. در حالی که نیروی تبلور نمک در حفرات داخلی، توانایی غلبه بر نیروی مقاوم سنگ را نداشته و صرفاً به صورت افزایش وزن نمود می یابد که نشانگر نفوذ نمک به داخل سنگ می باشد. بنابراین افت وزنی ناشی از جدایش ذرات و لایه های سطحی با افزایش وزن ناشی از نفوذ نمک جبران گشته و حتی افزایش وزن نیز مشاهده می گردد. این پدیده نیز در سنگ آهک همه کسی با حداکثر درصد تخلخل در بین نمونه های مورد آزمایش بخوبی قابل مشاهده است.

در ادامه به بررسی روند تغییرات وزنی ذرات در اندازه های مختلف در سنگ های آهکی با بافت های متفاوت پرداخته شده است. از آنجا که در بررسی های انجام شده نمونه همه کسی با بافت بایوکلیستیک پکستون (بایواسپارایت)، روند افت وزنی یکساختی را در تمامی اندازه ذرات نشان داده است و از سوی دیگر تفاوت فاحشی در میزان افت وزنی با دیگر نمونه ها داشته است و نیز به منظور کاربرد مقیاس مناسب تر در شکل ها، سایر بافت ها با مقیاس کوچکتر در هر شکل نمایش داده شده اند. بعلاوه تصاویری از نمونه های سنگدانه اکباتان و همه کسی در اندازه های مختلف قبل و بعد از آزمایش سلامت سنگ در برابر محلول های سولفات سدیم و منیزیم در شکل های (۳) تا (۶) ارائه شده است.

### ۳-۴- بررسی اثر پتروگرافی (بافت) بر افت وزنی در آزمایش سلامت سنگ

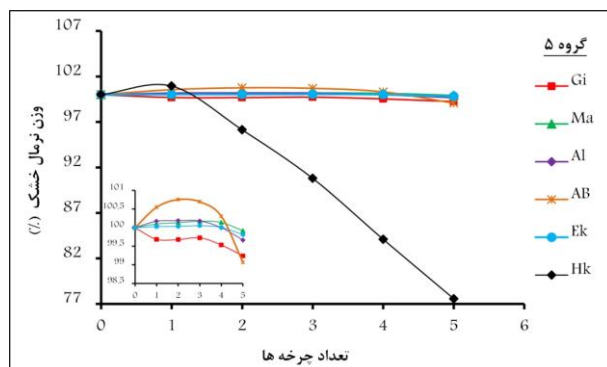
#### ۳-۴-۱- بررسی روند افت وزنی در اندازه ذرات گروه ۷ (۵۰ تا ۶۳ میلی متر)

شکل (۷) روند تغییر وزن در ذرات گروه ۷ را تحت آزمون سلامت سولفات سدیم نشان می دهد. همانطور که در جدول ۴ و شکل مذکور مشاهده می شود، در چرخه سوم این آزمایش افزایش وزن و بعبارتی کاهش میزان افت وزن نسبت به چرخه های قبل و بعد

### ۳-۴- بررسی اثر پتروگرافی (بافت) بر افت وزنی در آزمایش سلامت سنگ

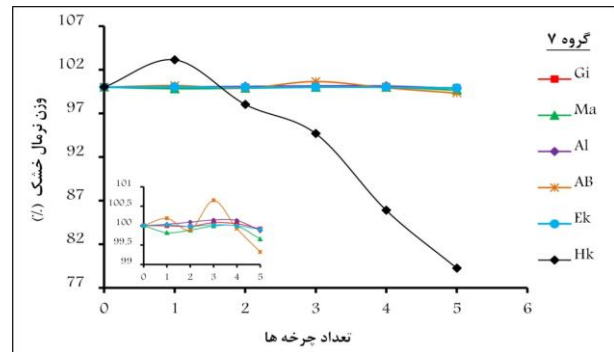
#### ۳-۴-۱- بررسی روند افت وزنی در اندازه ذرات گروه ۷ (۵۰ تا ۶۳ میلی متر)

شکل ۷ (۷) روند تغییر وزن در ذرات گروه ۷ را تحت آزمون سلامت سولفات سدیم نشان می‌دهد. همانطور که در جدول ۴ و شکل مذکور مشاهده می‌شود، در چرخه سوم این آزمایش افزایش وزن و عبارتی کاهش میزان افت وزن نسبت به چرخه‌های قبل و بعد رخ می‌دهد (به استثنای نمونه همه‌کسی) و در چرخه‌های بعد از آن تمامی نمونه‌ها افت وزنی نشان می‌دهند، که در چرخه پنجم به حداکثر مقدار می‌رسد. فرآیندی که باعث افزایش یا کاهش وزن در چرخه اول می‌گردد، بدین نحو قابل توضیح می‌باشد که در اولین چرخه، محلول نمک به درون ریزترک‌ها و یا حفرات سنگ نفوذ می‌کند. در نمونه‌هایی که درصد تخلخل و جذب آب پایینی دارند و یا تخلخل مفید کمی دارند، فقط حفرات و ترک‌های سطحی اشباع شده و تبلور نمک در حفرات و ترک‌های مذکور باعث جدایش ذرات و لایه‌هایی از سنگ گردیده و افت وزنی در سنگ مشاهده می‌گردد. این پدیده در نمونه سنگ آهک ملایر با حداقل درصد تخلخل (جداول ۱ و ۲) دیده می‌شود.

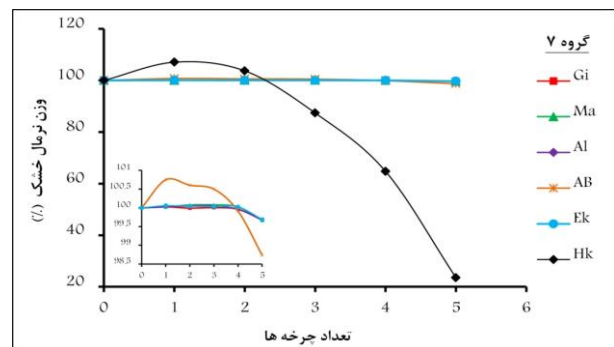


شکل ۷- روند تغییر وزن در ذرات گروه ۷ در بافت‌های مختلف در آزمون سلامت سولفات سدیم

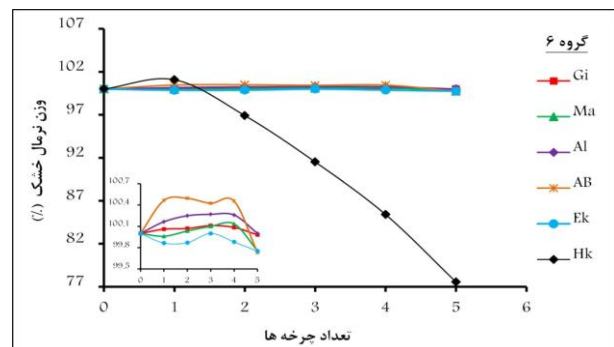
اما در نمونه‌هایی که جذب آب و تخلخل بیشتر و یا تخلخل مفید بیشتری دارند، حفرات و ترک‌های داخلی نیز اشباع می‌گردند. در حالی که نیروی تبلور نمک در حفرات داخلی، توانایی غلبه بر نیروی مقاوم سنگ را نداشته و صرفاً به صورت افزایش وزن نمود می‌یابد که نشانگر نفوذ نمک به داخل سنگ می‌باشد. بنابراین افت وزنی ناشی از جدایش ذرات و لایه‌های سطحی با افزایش وزن ناشی از نفوذ نمک جبران گشته و حتی افزایش وزن نیز مشاهده می‌گردد. این پدیده نیز



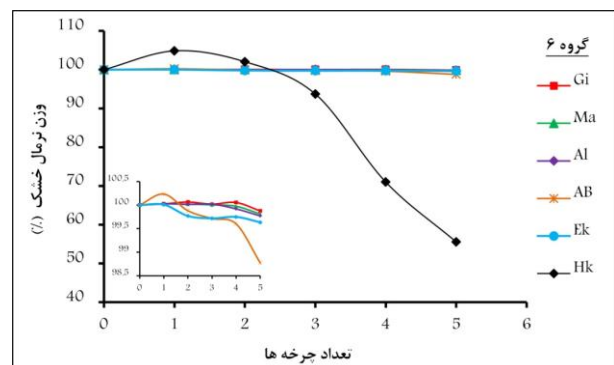
شکل ۳- تصاویر نمونه اکباتان در هفت گروه اندازه سنگدانه قبل و بعد از آزمایش سلامت سولفات منیزیم (S1 گروه هفت، S7 گروه یک)



شکل ۴- تصاویر نمونه اکباتان در هفت گروه اندازه سنگدانه قبل و بعد از آزمایش سلامت سولفات سدیم (S1 گروه هفت، S7 گروه یک)



شکل ۵- تصاویر نمونه همه‌کسی در هفت گروه اندازه سنگدانه قبل و بعد از آزمایش سلامت سولفات منیزیم (S1 گروه هفت، S7 گروه یک)



شکل ۶- تصاویر نمونه همه‌کسی در هفت گروه اندازه سنگدانه قبل و بعد از آزمایش سلامت سولفات سدیم (S1 گروه هفت، S7 گروه یک)

در سنگ آهک همه کسی با حداکثر درصد تخلخل در بین نمونه‌های مورد آزمایش بخوبی قابل مشاهده است. اما مکانیسمی که باعث افزایش وزن در مرحله سوم می‌گردد، بدین نحو قابل توضیح می‌باشد که در ادامه مراحل فوق فشار تبلور نمک باعث بازشدگی ترک‌های بیشتری شده و نفوذ محلول‌های نمکی بیشتر و در نتیجه افزایش وزن بیشتری رخ می‌دهد، که این امر منجر به افزایش وزن بیشتر در مرحله سوم می‌گردد. در این مرحله است که فشار تبلور نمک بر نیروهای مقاوم سنگ غلبه کرده و روند کاهش وزن در چرخه‌های بعدی آغاز می‌گردد. لازم به ذکر است که مرحله افزایش وزن در گروه‌های مختلف (اندازه‌های مختلف ذرات) در چرخه‌های متفاوتی رخ میدهد.

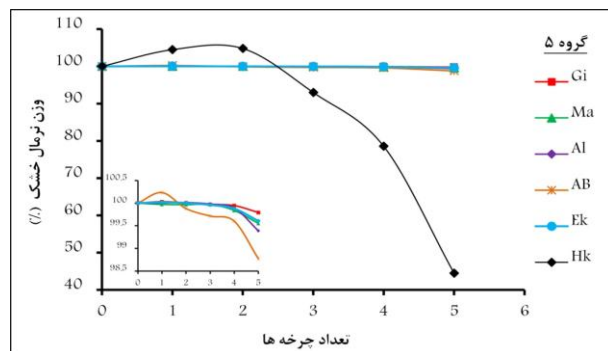
جدول ۴- مقادیر افت وزنی نمونه‌ها در چرخه‌های تبلور نمک سولفات سدیم

(علامت منفی (-) نشان دهنده کاهش وزن نمونه‌ها می‌باشد)

اندازه ذرات سنگدانه (میلی متر)							چرخه آزمایش	نمونه سنگ
۵۰-۶۳	۳۷/۵-۵۰	۲۵-۳۷/۵	۱۹-۲۵	۱۲/۵-۱۹	۹/۵-۱۲/۵	۴/۷۵-۹/۵		
-۰/۰۴	۰/۰۶	-۰/۳۱	۰/۰۷	۰/۱۱	۰/۲۸	۰/۶۷	۱	سراب گیان
۰/۰۷	-۰/۰۲	-۰/۳۲	۰/۰۶	۰/۰۸	۰/۲۶	۰/۴۷	۲	
۰/۰۸	-۰/۱۱	-۰/۲۷	۰/۱۷۰	۰/۳۵	۰/۴۶	۰/۶۷	۳	
۰/۰۵	۰/۰۸	-۰/۴۷	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۷۲	۰/۴۳	۴	
-۰/۰۸	-۰/۰۲	-۰/۷۶	-۰/۲۸	-۰/۶۰	-۰/۲۲	۰/۹۷	۵	
-۰/۱۸	-۰/۰۴	۰/۱	۰/۲۴	۰/۳۳	۰/۵۶	۰/۸۳	۱	ملایر
-۰/۱۲	۰/۰۳۵	۰/۱۳	۰/۲۰	۰/۲۸	۰/۳۲	۰/۳۰	۲	
-۰/۰۱	۰/۱۰	۰/۱۷	۰/۲۱	۰/۳۵	۰/۲۲	۰/۱۷	۳	
-۰/۰۱	۰/۱۳	۰/۱۴	۰/۲۰	۰/۱۲	۰/۱۴	-۰/۰۷	۴	
-۰/۳۴	-۰/۲۴	-۰/۰۹	-۰/۱۳	-۰/۴۹	-۰/۹۲	-۱/۹۷	۵	
۳/۱۳	۱/۰۸	۰/۹۴	۰/۷۳	۰/۸۹	۰/۷۶	۱/۱۰	۱	مه کسی
-۱/۹۸	-۳/۰۹	-۳/۸۷	-۴/۰۷	-۳/۹۹	-۳/۱۳	-۴/۲۸	۲	
-۵/۳۲	-۸/۴۹	-۹/۲۱	-۱۰/۲۶	-۸/۵۲	-۹/۱۳	-۸/۹۰	۳	
-۱۴/۱۲	-۱۴/۶	-۱۵/۹۰	-۱۷/۷۶	-۱۱/۸۳	-۱۱/۹۷	-۱۲/۴۵	۴	
-۲۰/۷۶	-۲۲/۴۵	-۲۲/۴۴	-۱۹/۰۰	-۱۴/۱۴	-۱۴/۵۶	-۱۵/۸۴	۵	
۰/۰۴	۰/۱۶	۰/۱۷	۰/۳	۰/۳۳	۰/۶۶	۱/۱۳	۱	علیصدر
۰/۰۹	۰/۲۵	۰/۱۹	۰/۲۴	۰/۲۴	۰/۵۴	۰/۳۳	۲	
۰/۱۵	۰/۲۷	۰/۱۸	۰/۰۷	۰/۲۴	۰/۵۲	۰/۶۷	۳	
-۰/۱۳	-۰/۲۶	۰	-۰/۳۰	۰/۲۹	۰/۳۲	-۰/۳۷	۴	
-۰/۱۳	۰	-۰/۳۳	-۰/۶۴	-۰/۷۴	-۱/۳۶	-۲	۵	
۰/۱۹	۰/۴۶	۰/۵۵	۰/۹۲	۱/۰۱	۱/۱۴	۱/۹۳	۱	آبشینه
-۰/۱۱	۰/۴۹	۰/۷۵	۱/۰۲	۱/۲۹	۱/۱۰	۱/۵۰	۲	
۰/۶۵	۰/۴۲	۰/۷۰	۰/۷۱	۰/۹۴	۰/۸۲	۰/۷۷	۳	
-۰/۰۸	۰/۴۵	۰/۳۰	۰/۸۸	۰/۸۶	۰/۹۰	۰/۷۳	۴	
-۰/۶۸	-۰/۲۷	-۰/۹۳	-۰/۳۰	-۱/۱۶	-۱/۰۶	-۳/۲۶	۵	
۰/۰۲	-۰/۱۳	۰/۰۳	-۰/۱۴	۰/۲۴	۰/۱۶	۰/۷۷	۱	سد اکباتان
-۰/۰۲	-۰/۱۳	۰/۰۳	-۰/۲۰	۰/۰۵۳	۰/۰۴	۰/۶۰	۲	
۰/۰۲۳	۰	-۰/۰۵	-۰/۱۲	۰/۲۰	۰/۲۰	۰/۸۰	۳	
۰	-۰/۱۲	۰/۰۱	-۰/۱۷	-۰/۲۸	-۰/۵۲	۰/۵۳	۴	
-۰/۱	-۰/۲۵	-۰/۱۹۰	-۰/۵۶	-۱/۰۵	-۱/۶۶	-۱	۵	



در شکل (۸) روند افت وزنی ذرات گروه هفت در آزمون سلامت سولفات منیزیم نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل و جدول (۵) مشاهده می‌گردد افزایش وزن در سیکل سوم رخ می‌دهد، این افزایش چنانچه در شکل‌های بعدی ملاحظه خواهد شد با اندازه ذرات مرتبط می‌باشد. این ارتباط بدین نحو است که در اندازه‌های بزرگتر ذرات، افزایش وزنی که منتهی به چرخه‌های افت وزنی می‌گردد، در چرخه‌های سوم و چهارم مشاهده می‌شود، در حالی‌که در ذرات کوچک‌تر این افزایش وزن در چرخه‌های اول و دوم دیده می‌شود. البته این افزایش وزن تحت تأثیر عوامل دیگری نیز می‌باشد که از آن جمله می‌توان به مقاومت سنگ و درصد تخلخل مفید آن اشاره کرد. در میان تمامی نمونه‌ها، نمونه همه‌کسی با بافت بایو کلستیکی پکستون (بایو اسپارایت)، بیشترین افت وزنی را در برابر محلول‌های سولفات سدیم (۲۰/۷۶٪) و سولفات منیزیم (۷۶/۴۲٪) نشان می‌دهد. نکته‌ای که در شکل‌های ۷ و ۸ درباره این بافت جلب توجه می‌نماید این است که در اولین چرخه آزمایش افزایش وزن رخ می‌دهد و در چرخه دوم افت وزنی به صورت نزولی آغاز شده و همین روند تا پایان آزمایش ادامه می‌یابد. این امر نمونه آهک همه‌کسی را از سایر نمونه‌های آهکی متفاوت نموده است. به طور حتم بروز چنین پدیده‌ای به دلیل ضعف سنگ می‌باشد. همچنین وجود تخلخل و جذب آب بالا ( $n=21/71$  و  $QAI=13/31$ ) باعث جذب مقدار زیادی از محلول سولفات در مرحله اول غوطه‌وری می‌گردد و از آنجا که در این سنگ سیمان تشکیل دهنده از نوع اسپارایت و درشت بلور می‌باشد، بنابراین نیروی تبلور نمک به راحتی بر نیروهای مقاوم سنگ غلبه کرده و باعث تخریب و افت وزنی در سنگ می‌گردد. به این ترتیب، هر مرحله از جذب محلول توسط سنگ، یک مقدار افت وزنی به دنبال خواهد داشت و این روند در تمامی گروه‌های دانه‌بندی این بافت (۷ گروه ذرات سنگدانه) در بخش‌های بعدی پژوهش نیز مشاهده شده است.



شکل ۸- روند تغییر وزن در ذرات گروه ۷ در بافت‌های مختلف در آزمون سلامت سولفات منیزیم

### ۴-۳-۲- بررسی روند افت وزنی در اندازه ذرات گروه ۶ (۳۷/۵ تا ۵۰ میلی متر)

شکل‌های (۹) و (۱۰) روند افت وزنی در ذرات گروه ۶ را طی آزمون‌های سلامت سولفات سدیم و منیزیم نشان می‌دهند. همانطور که در این شکل‌ها و جداول (۴) و (۵) مشاهده می‌شود، نمونه همه‌کسی با بیشترین افت وزنی در برابر محلول‌های سولفات سدیم و منیزیم (به ترتیب ۲۲/۴۵ و ۴۴/۴۴) از سایر نمونه‌ها کاملاً متمایز است. در این بررسی، روند تغییر وزن در نمونه آبشینه (بایو میکرایت) و همچنین تأثیر بافت حاوی فسیل و مقاومت سنگ را می‌توان مشاهده کرد. افزایش وزن اولیه بیشتر و نیز افت وزنی بیشتر نسبت به دیگر بافت‌ها مشاهده شده است. در برابر محلول‌های سولفات سدیم و منیزیم، میزان افزایش وزن در نمونه آبشینه از همه بیشتر است. علی‌صدر نیز تا چرخه ۴ افزایش وزن نشان می‌دهد.

از میان سایر نمونه‌های آهکی، روند افت وزنی در نمونه آبشینه با بافت بایو میکرایت با دیگر بافت‌ها متفاوت می‌باشد. به عبارت دیگر، این نمونه رفتاری بینابین نمونه سنگ آهک همه‌کسی و سنگ آهک‌های ملایر، علی‌صدر، اکباتان، سراب گیان دارد. این نمونه سنگ آهک مانند نمونه همه‌کسی حاوی فسیل است اما با فراوانی کمتر و سیمان میکرایتی که نسبت به سیمان نمونه همه‌کسی

جدول ۵- مقادیر افت وزنی نمونه‌ها در چرخه های تبلور نمک سولفات منیزیم

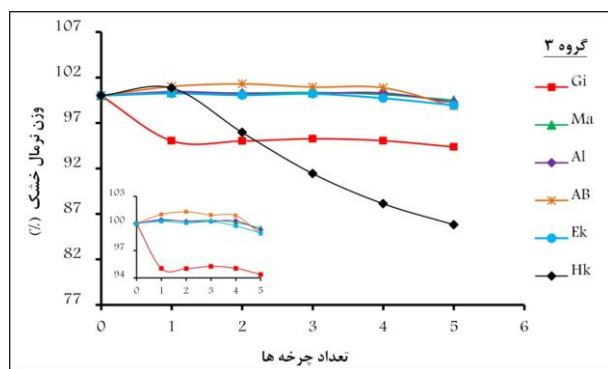
(علامت منفی (-) نشان دهنده کاهش وزن نمونه‌ها می‌باشد)

اندازه ذرات سنگدانه (میلی متر)							چرخه آزمایش	نمونه سنگ
۵۰-۶۳	۳۷/۵-۵۰	۲۵-۳۷/۵	۱۹-۲۵	۱۲/۵-۱۹	۹/۵-۱۲/۵	۴/۷۵-۹/۵		
۰/۰۳	۰/۰۲۵	۰/۰۳	۰	۰/۱	۰	۰/۲۳	۱	سراب
۰/۰۳	-۰/۰۱	-۰/۰۳	-۰/۰۷	-۰/۱۹	-۰/۰۶	۰	۲	گیان
۰/۰۱	۰/۰۰۵	-۰/۰۳	-۰/۰۱	-۰/۰۷۷	-۰/۰۲	۰/۱	۳	
-۰/۰۴	۰/۰۳۵	-۰/۰۳	-۰/۱۲	-۰/۱۳	-۰/۱۸	-۰/۵۹	۴	
-۰/۲۸	-۰/۱۷	-۰/۱۵	-۰/۳۲	-۰/۶۵	-۰/۵۶	-۱/۶۷	۵	
۰/۰۳	۰/۰۲۵	-۰/۰۲	-۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۶	۰/۰۶۶	۱	
۰/۰۵	-۰/۰۱	-۰/۰۱	۰/۰۱	-۰/۰۵	۰/۰۲	۰/۴۳	۲	
۰	-۰/۰۱	۰/۰۱	-۰/۱۳	۰/۱۶	۰/۱۴	-۰/۴	۳	ملایر
-۰/۰۵	-۰/۰۳	-۰/۱۳	-۰/۰۸	-۰/۳۲	-۰/۴۸	-۰/۷۳	۴	
-۰/۳۶	-۰/۱۶۵	-۰/۲۹	-۰/۳۳	-۰/۴۲۷	-۰/۸۴	-۱/۶۷	۵	
۷/۰۷	۴/۸۵	۴/۴۸	۴/۲۸	۳/۷۴	۳/۷۷	۴/۷۲	۱	
۳/۳۵	۲/۸۱	۰/۳۱	۰/۶۴	-۰/۰۲	-۰/۴۲	-۴/۶۶	۲	
-۱۶/۳۳	-۸/۳۳	-۱۱/۸۱	-۲/۵	-۶/۰۵	-۳/۲۹	-۶/۱۱	۳	همه کسی
-۲۲/۶۳	-۲۲/۷۱	-۱۴/۴۲	-۱۴/۷۲	-۱۴/۵۴	-۶/۰۸	-۶/۴۴	۴	
-۴۱/۱۶	-۱۵/۴۴	-۳۴/۰۸	-۳۰/۵	-۲۲/۰۵	-۱۴/۸۹	-۱۶/۲۶	۵	
۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۲	-۰/۰۴	۰/۰۸	۰/۲	۱	
۰/۰۲	-۰/۰۱	۰/۰۱	۰	۰/۰۴	۰/۱۶	۰	۲	
۰	۰/۰۱	-۰/۰۳	-۰/۰۲	-۰/۰۹	-۰/۱۴	۰/۴۰	۳	علیصدر
-۰/۰۹	-۰/۱	-۰/۰۹	-۰/۲۴	-۰/۳۸	-۰/۴۴	-۱/۱۰	۴	
-۰/۲۷	-۰/۱۵	-۰/۷۲	-۰/۴۴	-۰/۶۱	-۱/۱۴	-۱/۷۶	۵	
۰/۷۵	۰/۲۳	۰/۱۳	۰/۱۱	۰/۲	۰/۳۶	۰/۴۷	۱	
-۰/۱۴	-۰/۳۵	-۰/۱۱	-۰/۱۱	-۰/۲۵	-۰/۵۸	-۱	۲	
-۰/۱۰	-۰/۱۶	-۰/۱۸	-۰/۰۲	-۰/۱۲	-۰/۱۲	-۰/۶۷	۳	آبشینه
-۰/۵۹	-۰/۱۱	-۰/۲۹	-۰/۴۳	-۰/۱۵	-۰/۴	-۰/۷۶	۴	
-۱/۱۸	-۰/۸۳	-۰/۸۵	-۰/۴۸	-۰/۴۴	-۰/۴۸	-۱/۵۳	۵	
۰/۰۶	۰/۰۱	۰/۰۲	-۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۳۰	۱	
-۰/۰۲	-۰/۲۴	-۰/۰۲	-۰/۱۲	-۰/۱۲	-۰/۱۲	-۰/۲۰	۲	سد
-۰/۰۱	-۰/۰۵	-۰/۰۴	-۰/۱۵	-۰/۱۲	-۰/۳۶	-۰/۱۷	۳	اکباتان
-۰/۰۱	۰/۰۳	-۰/۰۸	-۰/۲۲	-۰/۴۱	-۰/۱۸	-۰/۰۳	۴	
-۰/۳۳	-۰/۱۲	-۰/۲۷	-۰/۳۹	-۰/۶۰	-۱/۱۸	-۰/۷۳	۵	

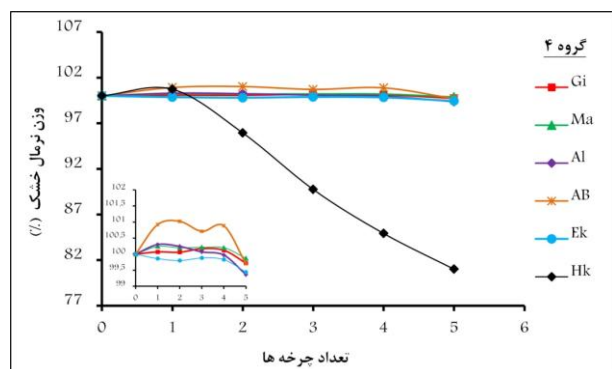
نمونه‌های ملایر و اکباتان در چرخه اول افت وزنی نشان داده‌اند و به ترتیب در چرخه ۳ و ۴ افت نهایی صورت گرفته است. همچنین بطور کل می‌توان بیان کرد که در این گروه از ذرات (گروه ۶) آغاز افزایش وزن بین چرخه‌های ۳ و ۴ متغیر است. بیشترین افت وزنی در برابر محلول سولفات سدیم مربوط به نمونه‌های آبشینه، اکباتان و ملایر (۲۵/۰٪) است و در برابر محلول سولفات منیزیم نمونه آبشینه بیشترین افت وزنی (۱/۲۳٪) را داشته است. نمونه‌های سنگ آهک علیصدر و ملایر که هر دو بافت متبلور (به ترتیب دولستون و آهک بلورین) داشته و تخلخل کم یا فاقد تخلخل هستند، در برابر محلول سولفات منیزیم تغییر چندانی از نظر وزنی

نشان نمی‌دهند. به عبارت دیگر، تشابه بافتی در نمونه‌های بلورین (نمونه ملایر و علیصدر) باعث شده است تا چرخه افزایش وزن در هر دو نمونه و در طی هر دو آزمایش مشابه باشد که این مطلب در مورد بافت برش آهکی (نمونه سراب گیان) و کنگلومرای آهکی (نمونه اکباتان) که هر دو زمینه میکرایتی دارند، نیز صادق است. با مقایسه شکل‌های مذکور این مطلب به وضوح مشاهده می‌گردد که افزایش وزن‌های اولیه در آزمون سلامت سولفات منیزیم نسبت به آزمون سلامت سولفات سدیم کمتر است، اما در عوض افت وزنی نهایی بیشتر می‌باشد که این مطلب در سایر گروه‌ها نیز کمابیش به چشم می‌خورد.

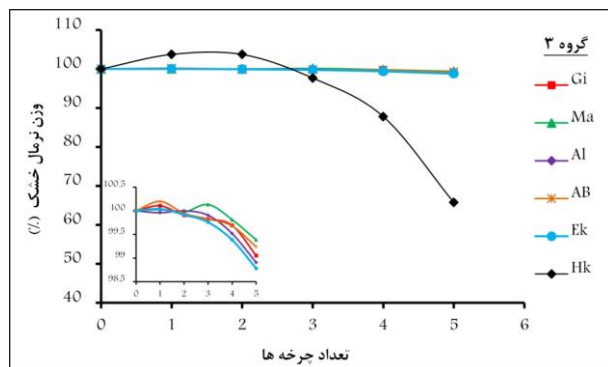
محلول‌های سولفات سدیم و منیزیم بیشترین افت را نشان داده است و این روند را در سایر گروه‌ها نیز نشان می‌دهد. نمونه آبشینه نیز حدواسط نمونه همه‌کسی (با سیمان اسپارایتی) و ۴ نوع سنگ آهک دیگر (با زمینه میکرایتی) است (افت وزنی در آزمون سلامت سولفات سدیم: ۰/۹۴٪ و سولفات منیزیم: ۱/۲۳٪). البته میزان افت وزنی نهایی در این نمونه بیشتر از سایر نمونه‌ها است. همچنین روند افت وزنی در نمونه آبشینه در گروه ۵ نیز تفاوت زیادی با دیگر بافت‌ها ندارد. شباهت روند افت وزنی در چهار بافت میکرایت برشی (نمونه سراب گیان)، کنگلومرای آهکی (نمونه اکباتان)، آهک بلورین (نمونه ملایر) و دولستون (نمونه علیصدر) در این شکل نیز دیده می‌شود.



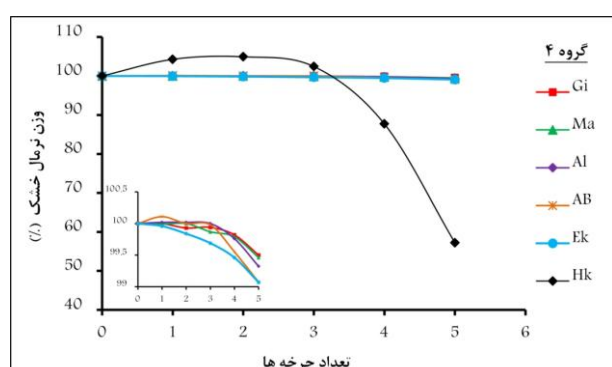
شکل ۱۱- روند افت وزنی در آزمون سلامت سولفات سدیم در ۵ ذرات در بافت‌های مختلف.



شکل ۹- روند افت وزنی در آزمون سلامت سولفات سدیم در ۶ ذرات در بافت‌های مختلف



شکل ۱۲- روند افت وزنی در آزمون سلامت سولفات منیزیم در ۵ ذرات در بافت‌های مختلف.



شکل ۱۰- روند افت وزنی در آزمون سلامت سولفات منیزیم در ۶ ذرات در بافت‌های مختلف

#### ۴-۳-۴- بررسی روند افت وزنی در اندازه ذرات گروه ۴ (۱۹ تا ۲۵ میلی متر)

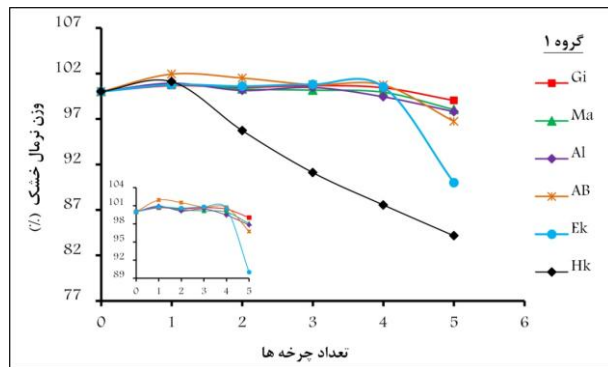
شکل‌های (۱۳) و (۱۴) و جداول (۴) و (۵) روند افت وزنی در ذرات گروه ۴ را طی آزمون‌های سلامت سولفات سدیم و منیزیم نشان می‌دهند. نکاتی که در شکل‌های قبل نیز به آن‌ها اشاره گردید، در این

#### ۴-۳-۳- بررسی روند افت وزنی در اندازه ذرات گروه ۵ (۲۵ تا ۳۷/۵ میلی متر)

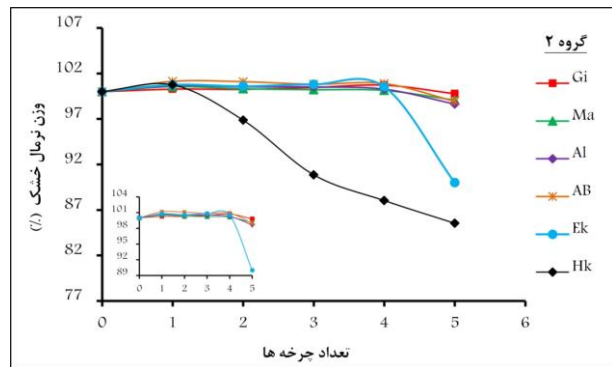
شکل‌های (۱۱) و (۱۲) و جداول (۴) و (۵) روند افت وزنی در ذرات گروه ۵ را طی آزمون‌های سلامت سولفات سدیم و منیزیم نشان می‌دهند. نمونه همه‌کسی با افت وزنی ۲۲/۴۴ و ۵۵/۵۳ درصد در برابر

در این شکل‌ها به‌ویژه در شکل (۱۶) جلب توجه می‌نماید، افزایش شیب منحنی‌های افت وزنی می‌باشد. در شکل (۱۱) آغاز افزایش شیب منحنی ظاهر می‌گردد به عبارت دیگر اولین نشانه‌های افزایش شیب منحنی از گروه ۴ شروع می‌گردد و در گروه ۳ این افزایش شیب کاملاً واضح‌تر می‌گردد. بنابراین در ذرات کوچک‌تر، چرخه افزایش وزن به چرخه اول انتقال یافته و افت وزنی زودتر آغاز می‌گردد و بدین ترتیب شیب منحنی افزایش می‌یابد. از سوی دیگر میزان افت وزنی نیز تا حدودی افزایش نشان می‌دهد که دلیل دوم افزایش شیب منحنی می‌باشد. این پدیده در نمونه سراب گیان در محلول سولفات سدیم که نسبت به گروه قبلی افت وزنی بیشتری داشته (۵/۶۴٪) به وضوح قابل مشاهده است.

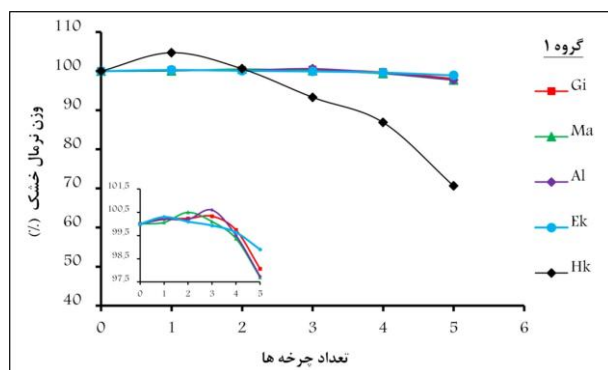
شکل‌ها نیز مشاهده می‌گردد. کاهش اندازه ذرات در آزمایش سلامت سنگ در برابر محلول سولفات منیزیم باعث تغییر چرخه افزایش وزن و انتقال آن به چرخه‌های اول و دوم گردیده است. همچنین میزان درصد افت وزنی در نمونه‌های ملایر، علیصدر، اکباتان و سراب گیان در هر دو شکل افزایش یافته است. البته این امر در خصوص نمونه‌های همه‌کسی و آبشینه صدق نمی‌کند و با کاهش اندازه ذرات سنگدانه (از گروه ۵ به ۴) درصد افت وزنی کاهش می‌یابد. روند افت وزنی متفاوت (آزمون سلامت سولفات سدیم) در بافت بایومیکرایت (نمونه آبشینه) و نیز تشابه روند در بافت‌های کنگلومرای آهکی (نمونه اکباتان)، برش آهکی (نمونه سراب گیان)، بافت آهک بلورین (نمونه ملایر) و دولستون (نمونه علیصدر) در این شکل‌ها به وضوح قابل مشاهده است.



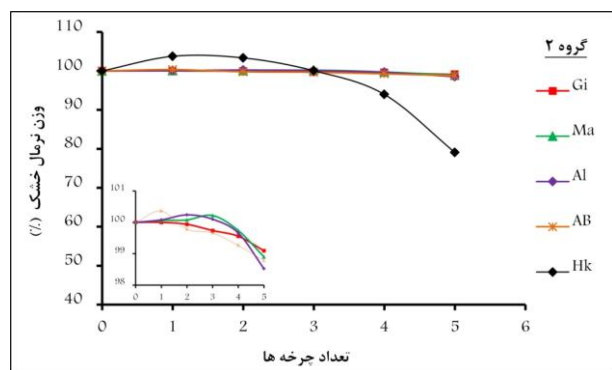
شکل ۱۵- روند افت وزنی در آزمون سلامت سولفات سدیم در ۳ ذرات در بافت‌های مختلف.



شکل ۱۳- روند افت وزنی در آزمون سلامت سولفات سدیم در ۴ ذرات در بافت‌های مختلف.



شکل ۱۶- روند افت وزنی در آزمون سلامت سولفات منیزیم در ۳ گروه ذرات در بافت‌های مختلف.



شکل ۱۴- روند افت وزنی در آزمون سلامت سولفات منیزیم در ۴ ذرات در بافت‌های مختلف.

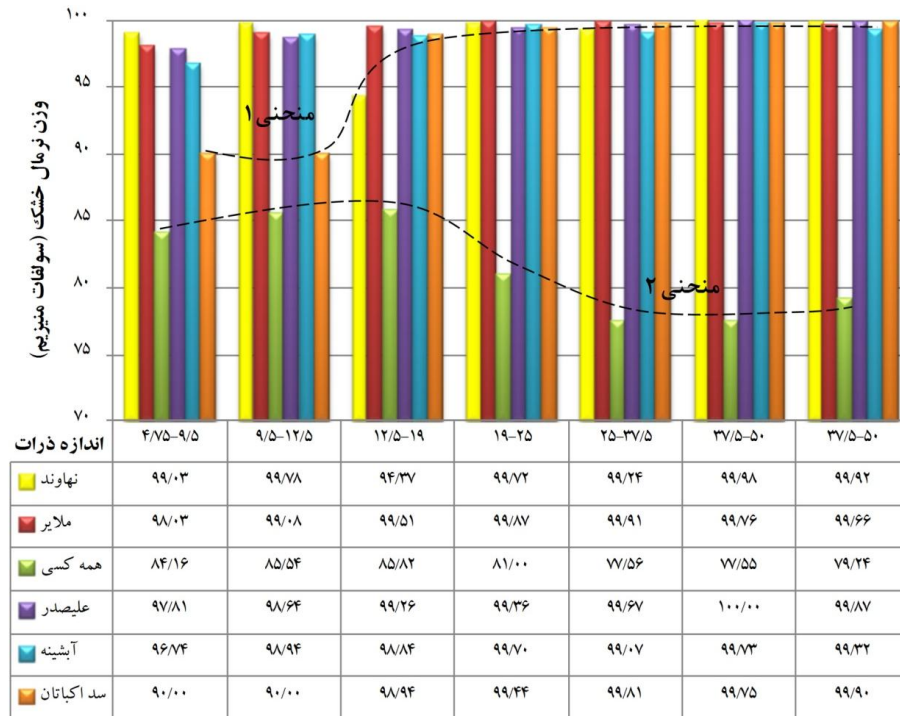
#### ۴-۳-۶- بررسی روند افت وزنی در اندازه ذرات گروه ۲ (۹/۵ تا ۱۲/۵ میلی متر)

شکل‌های (۱۷) و (۱۸) و جداول (۴) و (۵) روند افت وزنی در بافت‌های مختلف گروه ۲ را طی آزمون سلامت سولفات سدیم و سولفات منیزیم نشان می‌دهند. افت وزنی در بافت بایوکلستیک

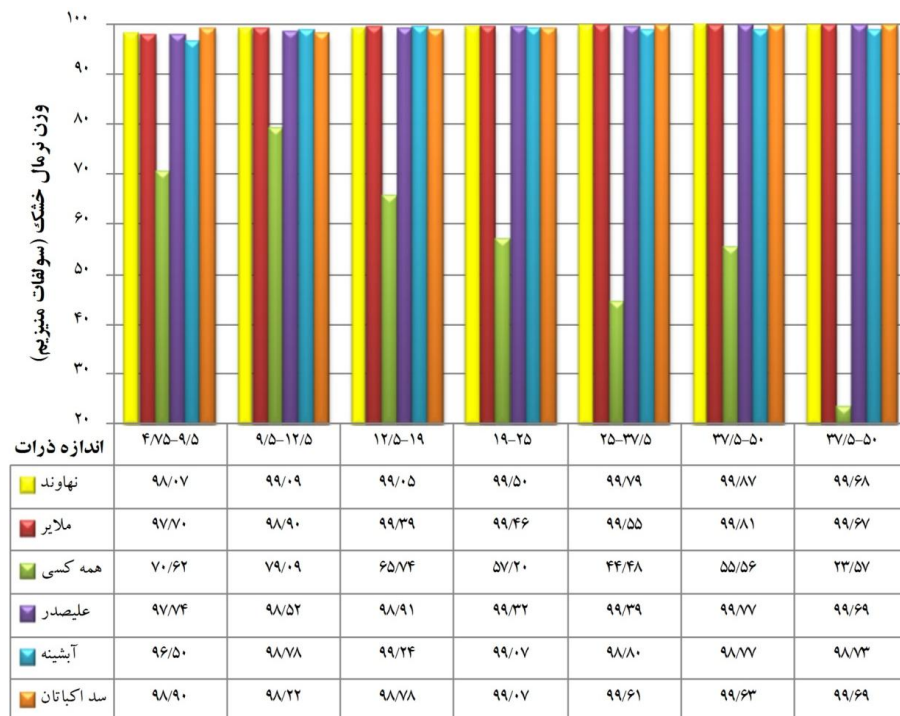
#### ۴-۳-۵- بررسی روند افت وزنی در اندازه ذرات گروه ۳ (۱۲/۵ تا ۱۹ میلی متر)

شکل‌های (۱۵) و (۱۶) و جداول (۴) و (۵) روند افت وزنی در آزمون سلامت سولفات سدیم و منیزیم در گروه ۳ ذرات سنگ-دانه را در بافت‌های مختلف نشان می‌دهند. مهم‌ترین نکته‌ای که

پکستون (بایو اسپارایت) در برابر محلول سولفات سدیم و منیزیم به ترتیب ۱۴/۱۶ و ۲۰/۹۲٪ است. در مورد بعضی از بافت‌های مورد مطالعه، انتقال چرخه افزایش وزن به چرخه‌های اولیه نسبت به کاهش اندازه ذرات، سیر هم‌مانگی را در دو آزمون سلامت سولفات سدیم و منیزیم نشان نمی‌دهند. لازم به ذکر است که شیب منحنی‌های افت وزنی در آزمایش‌های سلامت سولفات سدیم و منیزیم در این گروه نیز افزایش می‌یابد. در این گروه سنگ آهک اکباتان نسبت به گروه قبلی افت بسیار زیادی نشان داده است (سولفات سدیم: ۱۰/۰۱٪).



شکل ۱۷- روند افت وزنی در آزمون سلامت سولفات سدیم در گروه ۲ ذرات در بافت‌های مختلف.

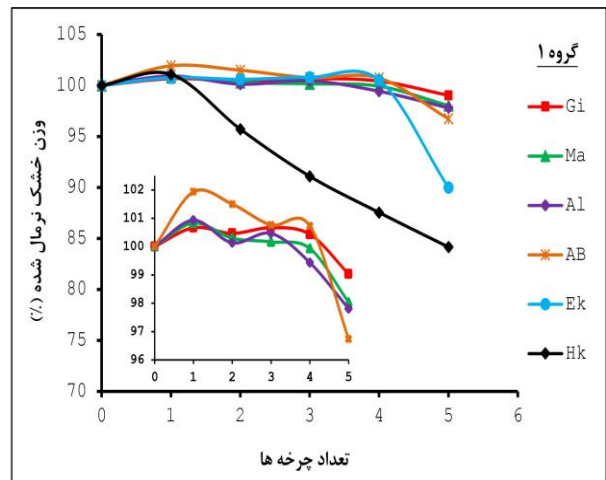


شکل ۱۸- روند افت وزنی در آزمون سلامت سولفات منیزیم در گروه ۲ ذرات در بافت‌های مختلف.

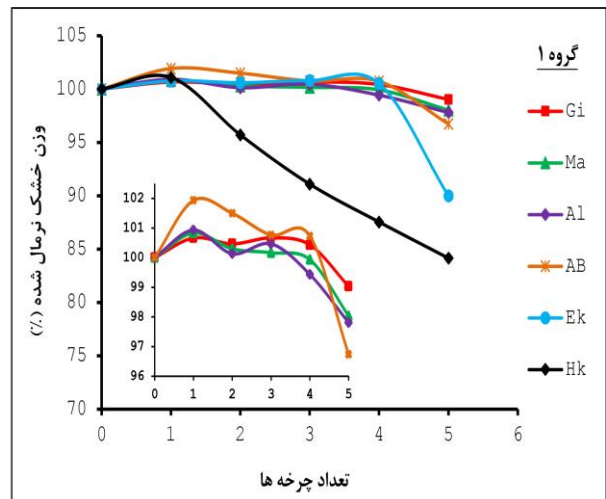
آهک در آزمایش سلامت سولفات سدیم و منیزیم نشان می‌دهند. همانطور که پیش از این بیان شد، می‌توان نمونه‌های سنگ آهک مورد مطالعه را بر اساس ویژگی‌های بافتی و روند افت وزنی در ۳ یا ۴ دسته شامل دسته اول نمونه همه‌کسی، دسته دوم نمونه آبتینه، دسته سوم نمونه‌های سراب گیان و سد اکباتان و دسته چهارم که از همه مقاومتر هستند شامل نمونه‌های ملایر و علیصدر طبقه‌بندی نمود. البته در اکثر موارد دسته سوم و چهارم روند افت وزنی مشابهی را نشان می‌دهند. اما با لحاظ نمودن شکل‌های ۲۱ و ۲۲ می‌توان نتیجه گرفت که سنگ آهک‌های مورد مطالعه را در ۲ دسته قرار گرفته‌اند و عبارتند از دسته اول (نمونه‌های ملایر، اکباتان، علیصدر، آبتینه و سراب گیان) و دسته دوم (نمونه همه‌کسی). مشخصات دسته اول عبارتست از کمترین درصد افت وزنی مربوط به گروه‌های ۴ تا ۷ و خصوصاً گروه ۵ و ۶ است. همچنین بیشترین افت وزنی مربوط به گروه‌های ۱ تا ۳ است. به عبارت دیگر با افزایش اندازه ذرات سنگ‌دانه میزان درصد افت وزنی در آزمایش سلامت سنگ کاهش می‌یابد (شکل ۲۱- منحنی ۱). Ioannou و همکاران (۲۰۱۳) نیز به بررسی اثر اندازه ذرات سنگ‌دانه آهکی پرداخته‌اند و نتایج تحقیق حاضر را تأیید نموده‌اند [۳]. آن‌ها نتیجه گرفتند که با کاهش اندازه ذرات سنگ‌دانه تا ۵ میلی‌متر، افت وزنی در آزمایش سلامت افزایش می‌یابد و بعد از آن افت وزنی ثابت می‌شود. سنگ آهک سد اکباتان در آزمون سلامت سولفات سدیم نسبت به سایر سنگ آهک‌های این دسته بیشترین میزان افت وزنی را نشان می‌دهد و علت آن شکستگی زیاد در نمونه سنگ بکر و درصد تخلخل بیشتر آن (تخلخل بیش از ۱۰ درصد) نسبت به سایر انواع سنگ آهک‌های مورد مطالعه (به استثنای نمونه همه‌کسی) است. همچنین نمونه سنگ آهک آبتینه نیز به علت فسیل فراوان (بافت بایومیکرایت) مستعد تخریب بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها در آزمایش سلامت سنگ است و به همین علت در بعضی از گروه‌های اندازه ذرات سنگ‌دانه رفتاری مشابه سنگ آهک همه‌کسی نشان می‌دهد اما روند کلی افت وزنی برای تمامی اندازه ذرات سنگ‌دانه در این نمونه مشابه سایر نمونه‌های آهکی است. در خصوص دسته دوم (سنگ آهک همه‌کسی) افت وزنی در تمام گروه‌ها بیش از ۱۵٪ است. همچنین با افزایش اندازه سنگ‌دانه‌ها افت وزنی افزایش می‌یابد که این امر عکس دسته اول است (شکل ۲۱- منحنی ۲). بنابراین نمونه‌های سنگ‌دانه مربوط به گروه‌های ۲ و ۳، سنگ‌دانه‌های مناسب‌تری

#### ۴-۳-۲- بررسی روند افت وزنی در اندازه ذرات گروه ۱ (۴/۷۵ تا ۹/۵ میلی‌متر)

شکل‌های (۱۹) و (۲۰) و جداول (۴) و (۵) روند افت وزنی طی آزمون سلامت سولفات سدیم و سولفات منیزیم را در گروه ۱ مصالح نشان می‌دهند. شکل‌های مذکور نیز روندهای کلی و ارتباطاتی را که در شکل‌های قبلی تشخیص داده شده است به‌ویژه گروه ۲ را دنبال می‌نمایند.



شکل ۱۹- روند افت وزنی در آزمون سلامت سولفات سدیم در گروه ۱ ذرات در بافت‌های مختلف.

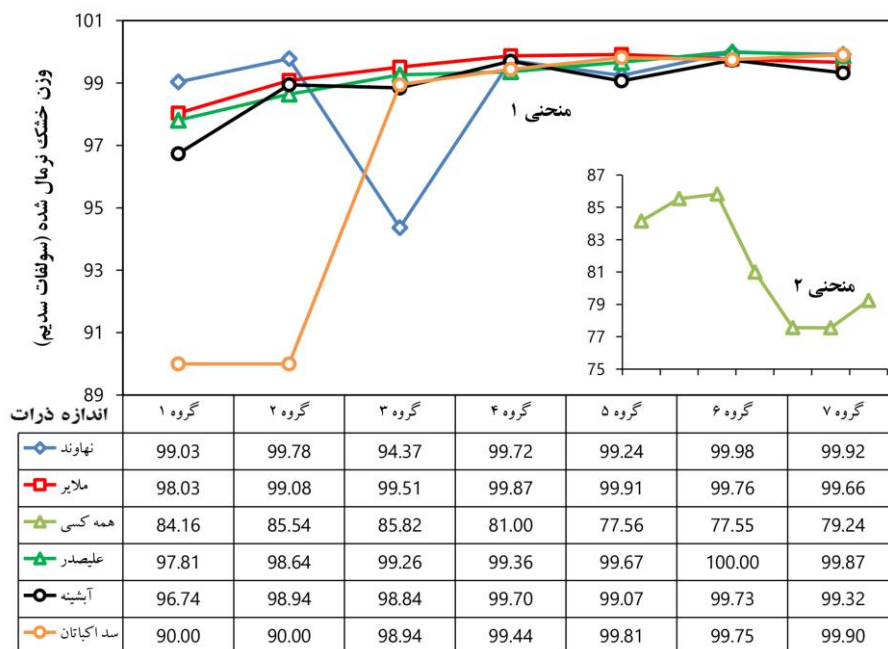


شکل ۲۰- روند افت وزنی در آزمون سلامت سولفات منیزیم در گروه ۱ ذرات در بافت‌های مختلف.

#### ۴-۴- بررسی اثر اندازه ذرات (دانه بندی) و بافت سنگ‌دانه بر افت وزنی

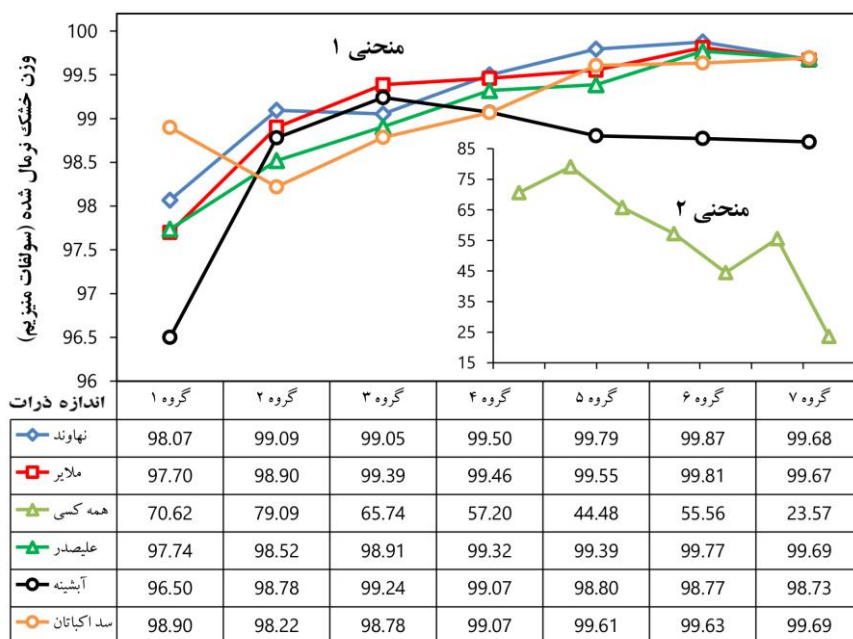
شکل‌های (۲۱) و (۲۲) و جداول (۴) و (۵) درصد افت وزنی را در هفت گروه سنگ‌دانه از نظر اندازه ذرات و نمونه‌های مختلف سنگ

هستند. همچنین در سنگ‌های ضعیف و با مقاومت کمتر مانند همه- کسی، سنگدانه‌های ریزتر برای پروژه‌های عمرانی مناسب‌تر هستند، زیرا هر چه اندازه آنها کوچک‌تر باشد، میزان حفرات بزرگ مقیاس نمونه‌های آهکی کاهش یافته و در نتیجه میزان درصد افت وزنی کاهش می‌یابد و نفوذ محلول‌ها نیز کاهش می‌یابد. هرچند افت وزنی زیاد در نمونه همه‌کسی سبب می‌شود که این نوع سنگ را نتوان به عنوان مصالح سنگ‌دانه‌ای به کار برد اما در صورت لزوم می‌توان با استفاده از سنگدانه‌های کوچکتر میزان افت وزنی آنها را کاهش داد. همچنین برای نمونه‌های آهکی مقاوم‌تر (دسته اول) هر چه اندازه سنگدانه بزرگتر باشد، مناسب‌تر است.



شکل ۲۱- ارتباط درصد افت وزنی در نمونه‌های سنگ آهک با بافت‌های مختلف و اندازه ذرات سنگدانه در آزمون سلامت سولفات

سدیم



شکل ۲۲- ارتباط درصد افت وزنی در نمونه‌های سنگ آهک با بافت‌های مختلف و اندازه ذرات سنگدانه در آزمون

سلامت سولفات منیزیم

و همه کسی بیشتر از محدوده یاد شده است. همچنین میزان درصد افت وزنی در آزمایش سلامت سنگ در تمامی نمونه‌ها (به استثنای نمونه همه کسی) به ترتیب کمتر از ۱۰٪ و ۱۵٪ برای سولفات سدیم و منیزیم بوده است. بنابراین نمونه آبتشینه از نظر پارامترهای سایشی مناسب نمی‌باشد و می‌توان از آن به عنوان کف پوش جاده که در معرض تنش‌های ضربه‌ای نباشد استفاده نمود. با در نظر گرفتن موارد ذکر شده، نمونه همه‌کسی برای تهیه سنگ‌دانه بتن به هیچ عنوان مناسب نمی‌باشد.

#### ۵- نتیجه گیری

با توجه به مطالبی که ذکر شد و با دقت در نتایج حاصل از آزمون‌های انجام گرفته به طور خلاصه می‌توان موارد زیر را به عنوان نتایج این پژوهش برشمرد:

۱. بررسی تغییرات وزنی در طی پنج چرخه آزمون نشان می‌دهد که در ذرات بزرگتر (ذرات گروه ۴ تا ۷) چرخه افزایش وزن که منتهی به کاهش وزن می‌گردد، در چرخه‌های سوم و چهارم قرار دارد در حالیکه در ذرات با اندازه کوچکتر (ذرات گروه ۳ تا ۱) چرخه افزایش وزن که منتهی به کاهش وزن می‌گردد، در چرخه‌های اول و دوم مشاهده می‌گردد.
۲. با توجه به اندازه ذرات، هرچه اندازه ذرات سنگ‌دانه کوچکتر می‌گردد به علت کاهش سطح تماس سنگ‌دانه‌ها و همچنین حضور بعضی مواد سیمانی که به علت کوچکی نمونه‌ها سریعتر از بین می‌روند، سبب کاهش پایداری بافت ذرات سنگ‌دانه در برابر نیروی ناشی از تبلور نمک شده و مقدار افت وزنی نهایی افزایش می‌یابد. البته این امر در مورد نمونه همه‌کسی صدق نمی‌کند و روند معکوسی را نشان می‌دهد. زیرا هر چه نمونه‌های متخلخل تر درشت دانه‌تر باشند اثر تخلخل بیشتر است و تجمع بلورهای نمک در حفرات بزرگتر سبب افزایش نیروهای کششی و تخریب بیشتر می‌شود.
۳. افت وزنی در پایان آزمون سلامت سولفات منیزیم بیشتر از آزمون سلامت سولفات سدیم می‌باشد.
۴. در بین بافت‌های مشابه به طور مثال بافت بلورین در نمونه ملایر و بافت دولستون در نمونه علیصدر و یا بافت برش آهکی در نمونه سراب گیان و بافت کنگلومرای آهکی در

بطور کل، برای تمامی نمونه‌های آهکی و گروه‌های سنگدانه‌ای می‌توان گفت که درصد افت وزنی در آزمون سلامت سولفات سدیم نسبت به آزمون سلامت سولفات منیزیم کمتر است. لازم به ذکر است که نتایج این تحقیق با نتایج بسیاری از محققان منطبق است [۲۲] تا [۲۴]. La Iglesia و همکاران (۱۹۹۷) بیان نمودند که میزان تخریب نمک‌ها وابسته به میزان فشاری است که نمک در هنگام تبلور ایجاد می‌کند و میزان فشار ناشی از تبلور با اندازه منافذ و کشش سطحی محلول نمک ارتباط مستقیم دارد. بر اساس کشش سطحی نمک‌ها، آنها نتیجه گرفتند که میزان تخریب حاصل از نمک سولفات منیزیم بیشتر از سولفات سدیم است [۲۲]. اگرچه استثنائاتی نیز در این مورد وجود دارد مانند گروه‌های ۱ و ۲ در نمونه سد اکباتان که افت وزنی قابل ملاحظه‌تری در آزمون سلامت سولفات سدیم داشته‌اند.

#### ۴-۵ بررسی مناسب بودن سنگ آهک‌های مورد مطالعه به عنوان سنگدانه بتن

مناسب بودن هر نوع سنگ برای کاربرد در تهیه بتن به ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی، سایشی و دوام در برابر عوامل فرسایشی مانند تبلور نمک، انجماد و آب شدن و ... بستگی دارد. بر اساس استاندارد (BSI ۸۸۲ (۱۹۸۳) چنانچه  $QAI < 3\%$ ،  $ACV < 30\%$ ،  $AIV < 30\%$ ،  $LAAV < 25\%$  باشد، سنگدانه مورد نظر برای تهیه بتن مناسب است [۲۵]. همچنین (۱۹۸۱) Dearman بیان نمود که مقاومت فشاری تک محوره (UCS) برای سنگ‌های مورد استفاده به عنوان سنگ‌دانه بتن باید بیشتر از  $35 \text{ MPa}$  باشد [۲۶]. Ariglu و Manzak (۱۹۹۱) نیز میزان دانسیته خشک ( $\gamma_d$ ) برای سنگدانه مناسب در تهیه بتن را  $2/6 \text{ (g/cm}^3\text{)}$  بیان نموده‌اند [۲۷]. در نهایت بر طبق استاندارد ملی ایران شماره ۴۴۹ میزان افت وزنی بعد از ۵ چرخه آزمایش سلامت سنگ، باید کمتر از ۱۰٪ در آزمایش سولفات سدیم و کمتر از ۱۵٪ برای آزمایش سولفات منیزیم باشد [۲۸]. بر اساس مقادیر دانسیته خشک، نمونه همه‌کسی و آبتشینه دارای مقادیر کمتر از محدود ذکر شده هستند. میزان LAAV برای نمونه‌های سراب گیان، آبتشینه و همه‌کسی نیز بیشتر از محدود مورد نظر برای سنگدانه بتن است. مقدار AIV برای تمام نمونه‌ها به استثنای نمونه همه‌کسی در محدود ذکر شده قرار دارد و مقدار ACV برای نمونه آبتشینه



aggregate. Engineering Geology, Vol. 75, No. 3-4, pp. 291-307, (2004).

[8] Zarif I.H, Tugrul A. Aggregate properties of Devonian limestones for use in concrete in Istanbul, Turkey. Bulltin of Engineering Geology and the Environment, Vol. 62, pp. 379-388, 2003.

[V] ناصری، ف.، بررسی خواص ژئومکانیکی سنگ‌های آهکی جنوب و جنوب شرق استان همدان به عنوان مصالح سنگدانه‌ای. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه بوعلی سینا همدان، ۱۳۹۲.

[A] عثمان پور، آ.، مطالعه خصوصیات زمین شناسی مهندسی سنگ‌های آهکی شمال و شمال شرق همدان به عنوان مصالح سنگدانه‌ای. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه بوعلی سینا همدان، ۱۳۹۲.

[11] Karimi H, Taheri K. Hazards and mechanism of sinkholes on Kabudar Ahang and Famenin plains of Hamadan, Iran. Natural Hazards, Vol. 55, pp. 481-499, 2010.

[12] Khanlari G.R, Ahmadi L, Mohammadi S.D. A Geotechnical Investigation of the Effect of Grain Size and Texture of Calcareous Rocks on Their Engineering Behavior", 7th EureGeo2012, Bologna, Italy, 2012.

[13] ISRM suggested methods: rock characterization. Testing and Monitoring: International Society of Rock Mechanics Suggested Methods. Pergamon Press, London, 1981.

[14] ISRM suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials. Int J Rock Mech Sci Geomech Abstr 18:85-110, 1979.

[15] ISRM suggested methods for determining tensile strength of rock materials. Int J Rock Mech Sci Geomech Abstr 15:99-103, 1978.

[16] BSI 812: Part 110. Methods for determination of aggregate crushing value. British Standards Institution, London, 1990.

[17] BSI 812: Part 112. Methods for determination of aggregate impact value. British Standards Institution, London, 1990.

[18] ASTM standard test method for the resistance to degradation of small-size coarse aggregates by abrasion and impact in the Los Angeles Machine, C131-03, v. 04.02, West Conshohocken, PA, 2006.

[19] ASTM standard test method for soundness of aggregates by use of sodium sulfate or manesium sulfate, ASTM C88-90. Annual book of ASTM Standards, Vol. 14, 1996.

[20] Dunham R.J., Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In Ham WE (ed) Classification of carbonate rocks, vol 1. American Association of Petroleum Geologists Memoir, pp 108-121, 1962.

نمونه اکباتان، روند افت وزنی شباهت بسیاری به یکدیگر دارند. این مطلب مؤید آن است که بافت سنگ تأثیر ویژه‌ای بر روند افت وزنی در نمونه‌های مورد مطالعه دارد.

۵. از میان سنگ آهک‌های مورد مطالعه تمامی نمونه‌ها به استثنای نمونه‌های آبشینه و همه‌کسی برای کاربرد به عنوان سنگ‌دانه بتن مناسب هستند و می‌توانند در مکان‌هایی که در معرض تآثیر یخ شکن قرار دارند، بتن مسلح و سایر پروژه‌های حساس عمرانی بکار روند. از آنجایی نمونه آبشینه از نظر مقاومت سایشی و ضربه‌ای ضعیف است برای جاده‌ها و کف پوش‌هایی که زیاد در معرض تنش قرار ندارند، مناسب است و همچنین نمونه همه‌کسی به هیچ عنوان برای تهیه بتن مناسب نیست مگر در شرایط اضطرار که بایستی از سنگ‌دانه‌های ریزتر استفاده نمود.

## ۶- مراجع

[1] Wu Y, Parker F, Kandhal K. Aggregate toughness/abrasion resistance and durability/soundness tests related to asphalt concrete performance in pavements. Alabama: Auburn University; 1998. NCAT Report. No: 98-4.

[2] Goswami S.C. Influence of geological factors on soundness and abrasion resistance of road surface aggregates: a case study. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Vol. 30, pp. 59-61, 1984.

[3] Ioannou I, Fournari R, Petrou M.F. Testing the soundness of aggregates using different methodologies. Construction and Building Materials Vol. 40, pp. 604-610, 2013.

[4] Alves C, Figueiredo C, Sequeira Braga M.A, Maurício A, Aires-Barros L. Aesthetic Failure of Limestones Under Salt Crystallisation Tests, Paper Ref: S2007\_P0317, 3rd International Conference on Integrity, Reliability and Failure, Porto/Portugal, 20-24 July, 2009.

[5] Kazi A, Al-Mansour Z.R. Influence of geological factors on abrasion and soundness characteristics of aggregates. Engineering Geology, Vol. 15, pp. 195-203, 1980.

[6] Smith M.R., Collis L., Aggregates: Sand, gravel and crushed rock aggregates for construction purposes, Sp Pub 17. Geological Society, London, pp. 339, 2001.

[7] Korkanc M, Tugrul A. Evaluation of selected basalts from Nigde, Turkey, as source of concrete

- [21] Folk R.L., Practical petrographic classification of limestones. Am Assoc Pet Geol Bull 43:1–38, 1959.
- [22] La Iglesia A, Gonzalez V, Lopez-Acevedo V, Viedma C., Salt crystallization in porous construction materials I. Estimation of crystallization pressure. Journal of Crystal Growth, Vol. 177, No. 1-2, pp. 111–118, 1997.
- [23] Hayens H, O’Neil R, Neff M, Metha P.M. Salt weathering distress on concrete exposed to sodium sulphate environment. American Concrete Institute Materials Journal, Vol. 105, pp. 43, 2008.
- [24] Basista M, Weglewski W. Chemically assisted damage of concrete: a model of expansion under external sulphate attack. International Journal of Damage Mechanics, Vol. 18, pp. 155–175, 2009.
- [25] BSI standard for aggregates from natural sources for concrete. BS 882: 1983. British Standards Institution, London, 1983.
- [26] Dearman W.R., Engineering properties of carbonate rock. General report. Bull Int Assoc Eng Geol 24:3–17, 1981.
- [27] Arıoglu E, Manzak O., Evaluation of engineering properties of “coarse aggregates for concrete” produced in some quarry around Istanbul (in Turkish). Prefabrik Birliği 20:17–23, 1991.

[۲۸] استاندارد ملی ایران شماره ۴۴۹، سنگدانه-سلامت سنگدانه

با استفاده از محلول سولفات سدیم یا منیزیم-روش آزمون.

## Evaluating engineering properties of limestone aggregates for application in the concrete mixture (Case study from Hamedan limestone)

G.R. Khanlari

Department of Geology, Bu-Ali Sina University, Hamedan

F. Naseri \*

Department of Geology, Bu-Ali Sina University, Hamedan

Leila Ahmadi

Department of Geology, Bu-Ali Sina University, Hamedan

### Abstract

In this study, Hamedan province limestones including Malayer limestone, Sarab gian limestone, Hame kasi limestone, Abshineh limestone, Alisadr and Ekbatan limestones have been studied. Physical, mechanical and abrasion properties of the studied rocks with various textures have been investigated and finally the durability of limestone aggregates by rock soundness test with sodium and magnesium sulfate solutions has been considered. The obtained results have been compared with related standards and the suitability of the studied rocks as the concrete aggregates have been evaluated. Additionally, effects of texture and aggregates grain size have extensively been studied in this research. Therefore, Hamedan limestones have been classified into 7 fraction sizes according to ASTM C88 standard. Based on petrographical results, limestones with micrite matrix are more resistant against salt solutions than limestones with sparite cement and weight loss percentage in limestones with micrite matrix is less than 10%. Additionally, limestone aggregates with resistant texture are more durable against salt solutions when the fraction sizes of aggregates are coarser (groups 4 to 7) and these are suitable for civil projects. On the contrary, limestone aggregates with poor texture are more durable when the fraction sizes of aggregates are finer (groups 1 to 3) and it would be possible to use them in aggregate production on necessary occasions. Besides, based on abrasion properties of aggregates, Abshineh limestone can't be considered as a suitable material for places under abrasion and impact stresses.

**Keywords:** Limestone aggregates, Physical-mechanical properties, Rock soundness, Sodium and magnesium sulfate solutions, aggregates grading.

---

\* Corresponding Author: F.naseri91@basu.ac.ir

