

---

## ПРОГНОЗИРАНЕ НА ЛАБОРАТОРНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА СКАЛНИ СТРОИТЕЛНИ МАТЕРИАЛИ ЧРЕЗ ИЗПИТВАНЕ С ТОЧКОВО НАТОВАРВАНЕ

Д. Фотев<sup>1</sup>, Р. Върбанов<sup>2</sup>, Р. Нанкин<sup>3</sup>

*Ключови думи:* *точково натоварване, строителни скални материали, баластова призма, жп линии, Los Angeles, micro-Deval*

*Научна област:* *геотехника; строителни материали*

### РЕЗЮМЕ

Възможността за прогнозиране на лабораторните характеристики: устойчивост на дробимост по Los Angeles, устойчивост на износване по micro-Deval и устойчивост на третиране с магнезиев сулфат от данни от изпитване с точково натоварване е изучена за девет скални кариери с различни по произход скали (магмени, седиментни и метаморфни). Лабораторните изпитвания са извършени съгласно БДС EN 13450: 2013. Регресионният анализ показва убедителна корелация ( $r^2 = 0.92$ ) между загубата от изтриване по метода Los Angeles и точковото натоварване. Прогнозите за резултатите на останалите два показателя не са толкова добри.

### 1. Увод

Проучваните скални материали се използват за баластови призми на жп линии, както и за някои други приложения. Търсенето на такива материали нараства с увеличаване на строителството на железопътната инфраструктура в страната. Съпротивлението на дробимост и устойчивостта на износване са важни свойства за скалните материали за баластови призми на жп линии.

---

<sup>1</sup> Димитър Фотев, ас. инж. геол., кат. „Геотехника, УАСГ, бул. „Христо Смирненски“ № 1, София 1046, e-mail: dimitarfotew@abv.bg

<sup>2</sup> Радослав Върбанов, доц. д-р инж. геол., кат. „Геотехника“, УАСГ, бул. „Христо Смирненски“ № 1, София 1046, e-mail: r\_varbanov@mail.bg

<sup>3</sup> Росен Нанкин, ас. инж. геол., кат. „Геотехника“, УАСГ, бул. „Христо Смирненски“ № 1, София 1046, e-mail: r\_nankin@mail.bg

Обикновено съпротивлението на дробимост се определя по метода Los Angeles (LA), при който се измерва раздробяването на скалните късове, дължащо се на удрянето и разтрошаването им от стоманени топки.

Методът micro-Deval, характеризира износването на скалните материали за жп линии във водни условия в динамична среда.

Разрушаващото действие на магнезиевия сулфат се дължи на неговата кристализация в порите и празнините на скалните материали. Физически процесът е аналогичен на влиянието от замръзване и размръзване на водата в пукнатините на скалите.

Въпреки че определянето на посочените лабораторни методи е сравнително просто, те изискват доста време за провеждане на изследването и са сравнително скъпи в сравнение с някои по-лесни методи да изследване. Някои от тези методи като склерометър на Шмит и точковото натоварване са много лесни за изпълнение, изискват по-малки по размер образци и просто оборудване за изпитване, което е преносимо и може лесно да се използва в полеви условия.

Главната цел на това научно изследване е да се изучи възможността за оценка на съпротивлението на дробимост (по Los Angeles), устойчивостта на износване (по micro-Deval) и устойчивостта на третиране на магнезиев сулфат на скалните материали чрез използване на метода – разрушаване на скален образец при точково натоварване. Това е един по-бърз, по-лесен и по-евтин опит, който може да се прилага поне в стадия на предварителни геоложки и инженерно-геоложки проучвания.

За тази цел резултатите от лабораторните изпитвания (по Los Angeles и micro-Deval и изпитване с магнезиев сулфат) на образци от девет скални кариери с различни по произход скали са сравнени със съответните опитни резултати от изследвания, проведени с уред за точково натоварване. Изследван са скални образци от кариерите: Бов (диабаз), Карлуково (варовик), Хотница (варовик), Сини вир (варовик), Добромир (варовик), Българово (трахиандезит), Горно езерово (андезит), Струпец (кварцит), Братя Кунчеви (андезитови туфи), Черепиш (варовик).

## 2. Методи за изпитване

Свойствата на скалите зависят от техния генезис, минерален състав, тяхната структура и текстура или накратко те зависят от петроложките им свойства [9]. Тези свойства могат да бъдат дадени само по описателен начин, но в строителната практика се изисква характеристиките на свойствата да могат да бъдат оценени въз основа на резултатите от изпитвания, придружени от стойности и функционални връзки.

Опити за определяне на якостните свойства на трошен камък се извършват чрез въртящи се барабани (Los Angeles и micro-Deval), в които се поставя скалният материал, както и определен брой стоманени топки. При въртенето на барабаните има процеси на триене и удряне между късовете. Освен това късовете се удрят в стоманените топки и в стените на барабаните. Всичко това води до раздробяване и износване на материала.

*Съпротивлението на дробимост по метода на Los Angeles* се определя по БДС EN 1097-2:2010 [5]. Минималната проба е  $10\ 000 \pm 100$  g, съставена от две фракции  $31,5 \div 40,0$  mm и  $40,0 \div 50,00$  mm по  $5000 \pm 50$  g всяка, предварително промити и изсушени до постоянна маса. За това се изисква  $10\ 000$  g и 12 топки с обща маса 5,210 g. Изпитванията по метода LA са изпълнени във въртящ се барабан с диаметър 711 mm, в който са поставени топки (с диаметър от 45 – 49 mm), които намаляват вътрешния диаметър на барабана.

Изпитването по метода на Los Angeles включва следните процедури: Напълно изсушеният материал за изпитване от двете комбинирани фракции се поставя в барабана заедно с топките. Барабанът се завърта 1000 пъти с 31 – 33 завъртания/мин. Полученият след изпитването материал после се пресява през сито с отвори 1,6 mm, като се промива с водна струя. Запазената върху ситото фракция се изсушава, след което нейната маса се претегля и се записва. Устойчивостта на дробимост по метода на Los Angeles се определя по следната формула:

$$LA_{RB} = \frac{10000 - m}{100},$$

където  $m$  е масата на материала, запазен върху сито с отвори с размери 1,6 mm в грамове.

*Съпротивлението на износване по метода на micro-Deval* се определя по БДС EN 1097-1:2011 [4]. Опитът се извършва с апаратура, имаща барабан с вътрешен диаметър 200 mm и дължина 400 mm. Не се изисква използване на абразивен пълнител като стоманени топки.

Опитът се извършва с апаратура, имаща барабан с вътрешен диаметър 400 mm. Не е задължително да има абразивни топки. Изпитваният материал представлява комбинирана фракция с обща маса от 10000 g. Във всеки барабан се добавят 2 литра вода. След това барабанът се завърта 14 000 пъти с 95 – 105 завъртания в минута. Полученият след изпитването материал после се пресява през сито с отвори 1,6 mm, като се промива с водна струя. Запазената върху ситото фракция се изсушава, след което нейната маса се претегля и се записва. Устойчивостта на дробимост по метода на micro-Deval се определя по следната формула:

$$MD_{DE} RB = \frac{10000 - m}{100},$$

където  $m$  е масата на материала, запазен върху сито с отвори с размери 1,6 mm в грамове.

*Устойчивостта на магнезиев сулфат* се определя съгласно БДС EN 1367-2:2000 [6]. За определянето на устойчивостта на магнезиев сулфат се изискват проби с маса ( $10\,000 \pm 100$  g) и да съдържат ( $5000 \pm 50$  g) фракция 31,5÷40,0 mm и ( $5000 \pm 50$  g) фракция 40,0÷50,00 mm, предварително промити и изсушени до постоянна маса. Всяка лабораторна проба се подлага на десет цикъла на потапяне в 12 l наситен разтвор на магнезиев сулфат, което е последвано от отцеждане, промиване и сушене в сушилня с температура ( $110 \pm 5$  °C). Този процес се повтаря в продължение на десет цикъла, като всеки цикъл, отнема ( $48 \pm 2$ ) часа. Този опит подлага скалните материали на отрицателния ефект от повторната кристализация и дехидратация на магнезиевия сулфат в порите на скалната проба. Полученият след изпитването материал после се пресява през сито с отвори 22,4 mm.

Устойчивостта магнезиев сулфат (MS) се изчислява в проценти от масата на всеки опитен образец в съответствие със следното уравнение:

$$MS = \frac{100(M_1 - M_2)}{M_1},$$

където  $M_1$  е първоначалната сумарна суха маса на трите образеца за изпитване в грамове;  $M_2$  е крайната сумарна суха маса на трите образеца за изпитване, които са за-

държани на посоченото сито, в грамове;  $F$  е процентната загуба на маса на трите образци за изпитване след циклите на замразяване-размразяване.

#### *Изпитване с точково натоварване*

За пръв път анализът точково натоварване е описан от Брош и Франклин (1972) [10], като това изпитване често се представя като един косвен начин за измерване на якостта на натиск или якостта на опън на скалата. Апаратурата за точково натоварване се използва широко в практиката поради лесната работа с нея, простата подготовка на образците и прилагането ѝ в полеви условия. Предимствата на анализа за точково натоварване са разгледани от Брош и Франклин (1972) и са следните:

- Необходими са по-малки сили за провеждане на опита, така че може да се използва по-малък по размери и преносим (портативен) апарат.
- Изпитват се опитни образци във формата на ядка или късове с неправилна форма, при което не е необходимо предварителното им машинно оформяне.
- Анализът е евтин.
- Могат да бъдат изпитвани крехки и натрошени материали.

Редица изследователи (Д' Андреа и др., 1964; Райхмут, 1968; Брош и Франклин, 1972; Биенявски, 1975; Рийд и др., 1980; Гънсалус и Кулхави, 1984; Валежо и др., 1989; Каргил и Шакуур, 1990; Грасо и др., 1992; Чао и Вонг, 1996; Смит, 1997; Кахраман, 2001 и други) са извели зависимост между якостта при точково натоварване и якостта на едноосен натиск.



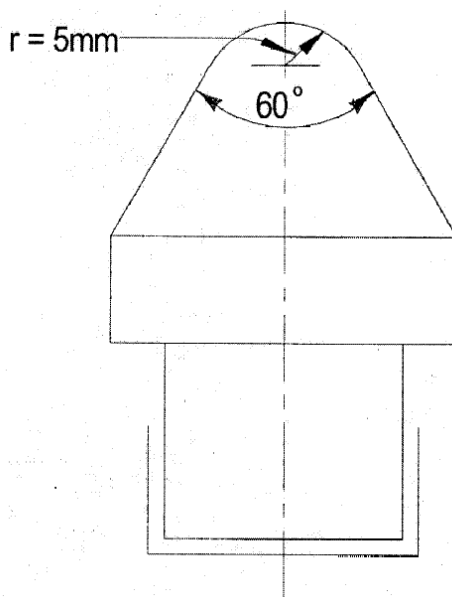
**Фиг. 1. Уред за точково натоварване, закупен по проект на УАСГ, София**

Индексът на точково натоварване се определя чрез подлагане на скалната проба на нарастващо концентрирано напрежение, докато настъпи разрушаване на пробата. Концентрираното напрежение се прилага чрез два противоположни метални конуса. Напрежението, което предизвиква разрушаване, се използва за изчисляване на индекса на точково натоварване. Този индекс може да се използва за класификация на скалите. Това е един прост метод за определяне на якостта на едноосов натиск на скалите.

Основно уредите за точково натоварване (фиг. 1) се състоят от система за подаване на натоварването, която обикновено е съставена натоварваща рамка, конични накрайници, измервателна система за отчитане на натоварването  $P$  (което разрушава пробата), и средство за измерване на разстоянието  $D$  между контактните точки на конусите и пробата преди изпитването и след разрушаването.

Системата за подаване на натоварването има натоварваща рамка с достатъчно разстояние между двата накрайника, което да позволява изпитване на скални проби с необходимия размер. Обикновено този диапазон е между 30 и 100 mm. Разстоянието между двата конуса се регулира в зависимост от размера на пробата.

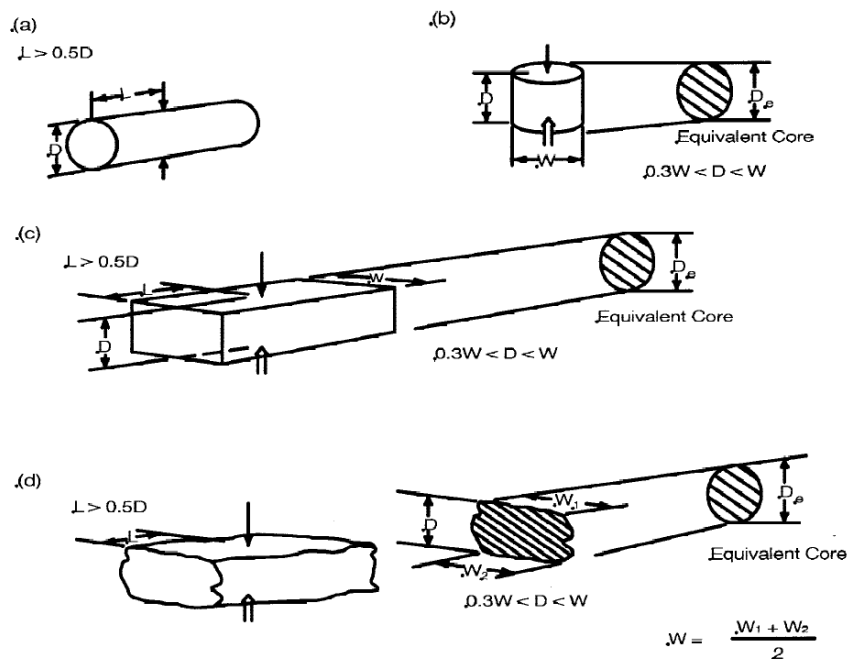
Използват се заоблени при върха метални конуси, както е показано на фиг. 2. Конусите имат ъгъл при две противоположни образуващи  $60^\circ$ , като върхът представлява една полуокръжност с радиус 5 mm. Конусите на уреда трябва да са от закалена стомана, така че да останат невредими по време на изпитването.



**Фиг. 2. Размери на конусен накрайник на уред за точково натоварване**

В зависимост от вида на изпитваната проба и начина на подаване на натоварването, изпитванията на точково натоварване могат да бъдат няколко вида. Изпитват се скални проби с цилиндрична форма (диаметрално или осово изпитване), правоъгълна форма (блоково изпитване) или неправилна форма.

Изискванията за размери и форма при диаметралното, осовото, блоковото изпитване и изпитването на тела с неправилна форма трябва да отговарят на препоръките, показани на фиг. 3.



Фиг. 3. Изисквания за поставяне на пробите в уреда при (а) на диаметрално изпитване, (б) осово изпитване, (в) блоково изпитване и (г) изпитване на образци с неправилна форма

Условни означения към фиг. 3:

$L$  = дължина на пробата,  $W$  = широчина на пробата,  $D$  = разстояние между конусите в контактните точки на конусите с пробата или диаметър на пробата и  $De$  = еквивалентен диаметър на ядката.

За настоящите цели изпитването на точково натоварване е извършено съгласно ASTM D5731 – 08 [7], като е използван методът за изпитване на тела с неправилна форма.

Първоначално се определя некоригираният индекс на точково натоварване  $I_s$  по следната формула  $I_s = P/De^2$ , МПа, където  $P$  е разрушаващо натоварване, N;

$De$  = еквивалентен диаметър на цилиндрична проба, mm.

За изпитване на тела с неправилна форма  $De^2 = 4A/\pi$ , където  $A = WD$  = минимална площ на напречното сечение на равнината през контактните точки на конусите.

Индексът на точково натоварване варира като функция от  $De$  при изпитването на тела с неправилна форма, така че корекция на формата се извършва, когато стойностите на  $D$  за всички образци са различни. Коригираната стойност на индекса на точково натоварване  $I_{s(D)}$  е приета за стойността на  $I_s$ , която би се получила при диаметрално изпитване с  $D = 50$  mm и се дава със символа  $I_{s(50)}$ .

Един от начините, по който може да се извърши корекцията на формата, е чрез формулата  $I_{s(50)} = F.I_s$ .

Корекционния коефициент  $F$  може да бъде получен чрез израза  $F = (De/50)^{0,45}$ .

Търсената якост на едноосов натиск може да бъде получена, като се използва следната формула  $S_c = 23.I_{s(50)}$ .

### 3. Корелационни зависимости между индекса на точково натоварване с различни показатели, характеризиращи свойствата на скалните материали

Материалите на десет от изследваните скални находища са изпитани чрез точково натоварване. Изпитванията са направени съгласно американския стандарт ASTM D5731 – 08 [7], като са използвани образци с неправилна форма. Стойностите на индекса на точково натоварване  $I_{s(50)}$  се изменят в диапазона от 4 МПа до 8,72 МПа.

Извършен е корелационен анализ между индекса на точково натоварване и следните показатели: устойчивостта на дробимост (по Los Angeles), устойчивост на износване (по micro-Deval), загубата на маса след изпитване с магнезиев сулфат (MS). Регресионният анализ показва корелация ( $r^2 = 0,92$ ) между устойчивостта на дробимост по метода Los Angeles и индекса на точково натоварване. Корелацията между устойчивостта на износване (по micro-Deval) и индекса на точково натоварване е слаба ( $r^2 = 0,41$ ). Между индекса на точково натоварване и процентната загуба на маса след изпитване с магнезиев сулфат не беше открита зависимост.

През първия етап на проекта по договор № БН 148-13 [3], финансиран от ЦНИП при УАСГ, беше изследвана възможността за оценка LA, MD, и MS по данни от склерометър на Шмит, като данните бяха статистически обработени и анализирани, за да се определи степента на корелация.

През втория етап от същия проект беше закупен нов уред (фиг. 1) с цел да се намери нов алтернативен метод за прогнозиране на коефициентите на LA, MD, и MS, чрез индекса на точково натоварване.

За настоящите цели изпитването на точково натоварване е извършено върху проби с неправилна форма (които бяха взети от кариерите през първия етап). Този метод на изпитване е най-подходящ за търсената корелационна зависимост, тъй като формата и размерите на късовете са същите като на материалите, които се влагат в баластовите призми и изпитването е по-близко до условията на работа в реална среда.

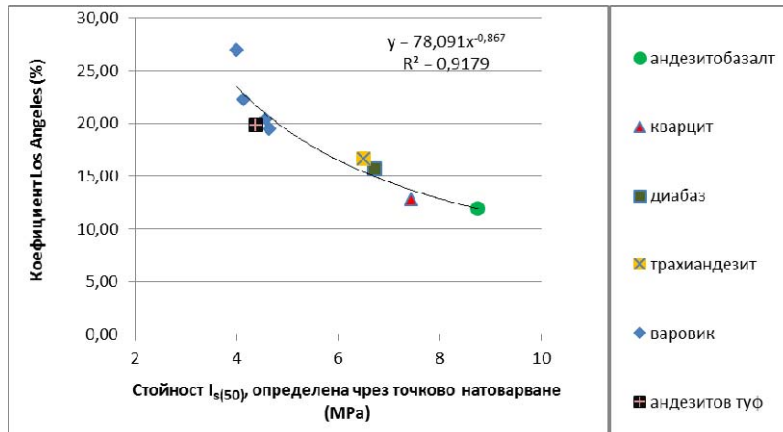
Резултатите от коефициентите на Los Angeles, micro-Deval, загубата на маса след третиране с магнезиев сулфат и индекса на точково натоварване са представени в табл. 1.

**Таблица 1. Местоположение и наименование на скалите и резултати от проведените изпитвания**

№ по ред	Кариера	Тип скала	Коефициент	Коефициент	Средна стойност на $I_{s(50)}$	Стойност от MgSO4	Стойност от чука
			Los Angeles %	micro-Deval %		Загуба на маса %	на Шмит (SHV) МПа
1	Горно езерово	андезит	11,94	5,35	8,75	18,48	60,2
2	Струпец	кварцит	12,80	3,67	7,44	6,37	58,6
3	Бов	диабаз	15,67	14,91	6,72	9,8	48,9
4	Българово	трахиандезит	16,67	7,35	6,51	32,44	48,1
5	Карлуково	варовик	19,51	7,89	4,63	0,4	40
6	Добромир	варовик	20,45	9,63	4,57	5,61	5,61
7	Братя Кунчеви	андезитов туф	19,78	15,84	4,39	23,02	23,02
8	Хотница	варовик	22,28	8,64	4,13	1,47	1,47
9	Сини вир	варовик	26,98	21,61	4,00	26,87	26,87

Опитните резултати, дадени в табл. 1, са анализирани, като е използван методът на регресия на най-малките квадрати. Линейна, логаритмична, експоненциална и степенна крива, доближаващи се до съответните зависимости, са пробвани и най-доброто приблизително уравнение с най-висок корелационен коефициент е определено за всяка регресия.

Стойностите на коефициента на дробимост по Los Angeles са корелирани с тези от точковото натоварване, като е получена много добра степенна зависимост (фиг. 4).

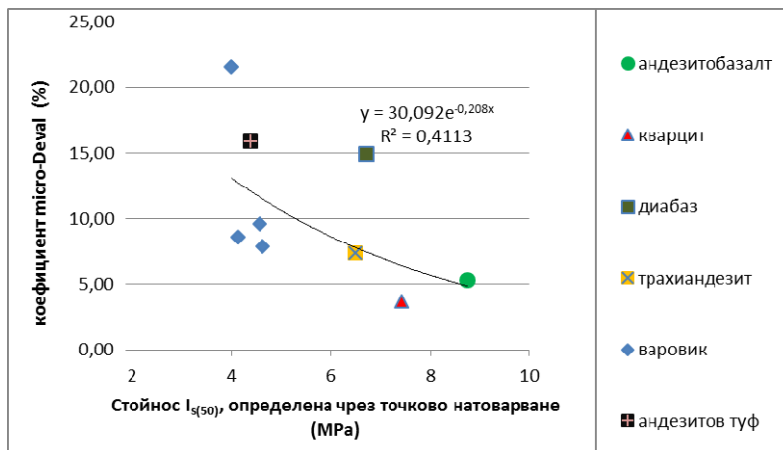


Фиг. 4. Зависимост между коефициента на Los Angeles и стойностите  $I_{s(50)}$ , получени от точково натоварване за 9 различни скални материала от България

Уравнението на кривата е  $LA = 78,1I_s(50)^{-0,867}$  при  $r^2 = 0,92$ .

Направена е и корелация между получените с точково натоварване стойности за  $I_{s(50)}$  и стойностите за устойчивостта на износване по micro-Deval, като получената корелационна зависимост е слаба.

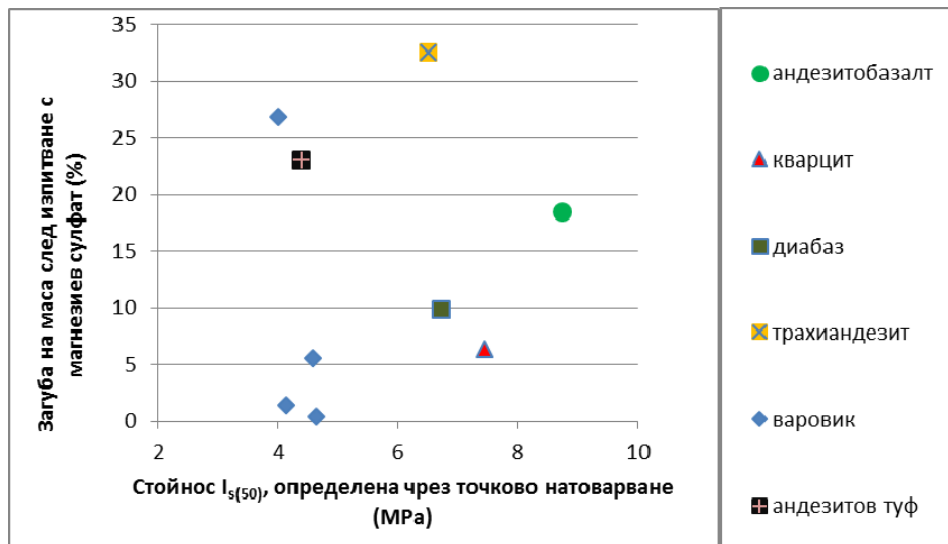
Зависимостта между коефициентите на micro-Deval и стойността на точковото натоварване е експоненциална фиг. 5.



Фиг. 5. Зависимост между коефициента на micro-Deval и стойностите  $I_{s(50)}$ , получени от точково натоварване за 9 различни скални материала от България

Уравнението на кривата е  $M_{DE} = 30,1e^{-0,21I_{s(50)}}$  при  $r^2 = 0,41$ .

При третия корелационен анализ между индекса на точково натоварване и стойностите за процентната загуба на маса, получена след изпитване с магнезиев сулфат, не беше получена зависимост, както се вижда на фиг. 5.



Фиг. 6. Зависимост между коефициента на загубата на маса след изпитване с  $MgSO_4$  и стойностите  $I_{s(50)}$ , получени от точково натоварване за 9 различни скални материала от България

#### 4. Заключение и препоръки за бъдещи изследвания

Проверена е възможността за прилагане на метода на разрушаване на скални образци при точково натоварване за определяне на якостните характеристики на скални образци с неправилна форма. От всяка кариера са изследвани представителен обем скални образци. Методът осигурява възможност, без съществена загуба на време да се определят якостните характеристики на изпитваните скали.

Извършен е корелационен анализ между индекса на точково натоварване и различни показатели на скалните материали. От посочените резултати се вижда индексът на точково ( $I_{s(50)}$ ) натоварване, показва се най-добра зависимост със стойностите на коефициента на дробимост по Los Angeles ( $r^2 = 0.91$ ). Това показва, че коефициентът на Los Angeles може да бъде прогнозиран по данни от изпитване с точково натоварване.

Останалите корелационни зависимости са с корелационен коефициент по-нисък от 0,5, т.е. не може да се установи нормална зависимост между изследваните характеристики. Резултатите явно са повлияни от обема на изследваните скални проби. Във връзка с това предлагаме в бъдещите изследвания да се увеличи броят на изпитваните скални разновидности, което да позволи разделяне на скалите на две групи, с оглед да се получат по-добри зависимости.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *БДС EN 13450:2013*. Скални материали за баластова призма на жп линии.
2. ASTM D5731 – 08. Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock and Application to Rock Strength Classifications.
3. Проект по договор № БН 148-13, на тема: "Изследване на зависимостите между характеристиките на скалните материали в България за целите на съвременното транспортно строителство", финансиран от ЦНИП при УАСГ“.
4. *БДС EN 1097-1:2011*. Изпитване за определяне на механични и физични характеристики на скалните материали. Част 1: Определяне съпротивлението на износване (micro-Deval).
5. *БДС EN 1097-2:2010*. Изпитване за определяне на механични и физични характеристики на скалните материали. Част 2: Методи за определяне на съпротивлението на дробимост.
6. *БДС EN 1367-2:2000*. Изпитвания за определяне на топлинни характеристики и устойчивост на изветряне на скалните материали. Част 2: Изпитвания с магнезиев сулфат.
7. *Ленов и Паназов*. Концепции за по-нататъшното използване на баласта за жп линии на БДЖ. Сп. „Железопътен транспорт“, 2000 г.
8. *Miklós Gálos, László Kárpáti*. Testing of Hungarian aggregates for railway ballast according to MSZ EN 13450: 2003. Department of Construction Materials and Engineering Geology, Budapest University of Technology and Economics, Budapest, 2007.
9. *Sair Kahraman, Osman Gunaydin*. Empirical methods to predict the abrasion resistance of rock aggregates.2007.
10. *Broch E, Franklin, J. A.* The Point Load Strength Test. Int. Journal Rock Mech. Min. Sci 9, 1972, pp. 669-697.

Постъпила: април 2015 г.

## PREDICTION OF LABORATORY CHARACTERISTICS OF ROCK BUILDING MATERIALS BY POINT LOAD TESTS

D. Fotev<sup>1</sup>, R. Varbanov<sup>2</sup>, R. Nankin<sup>3</sup>

**Keywords:** *point load, rock building materials, ballast prism, railways, Los Angeles, micro-Deval*

**Research area:** *geotechnics; building materials*

### ABSTRACT

The possibility of predicting the laboratory characteristics: resistance to fragmentation (by Los Angeles), resistance to wear (by micro-Deval) and magnesium sulfate soundness by means of point load tests is investigated for 9 quarries with different rock types (igneous, metamorphic and sedimentary). The laboratory tests are conducted according to BDS EN 13450: 2013. Regression analysis indicates a strong correlation ( $r^2 = 0.92$ ) between L.A. abrasion loss and the point load test. The predictions for the micro-Deval and the magnesium sulfate soundness results are not so good.

---

<sup>1</sup> Dimitar Fotev, Assist. Eng. Geol., Dept. "Geotechnics", UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: dimitarfotew@abv.bg

<sup>2</sup> Radoslav Varbanov, Assoc. Prof. Dr. Eng. Geol., Dept. "Geotechnics", UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: r\_varbanov@mail.bg

<sup>3</sup> Rosen Nankin, Assist. Eng. Geol., Dept. "Geotechnics", UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: r\_nankin@mail.bg

