



*Получена: 20.03.2019 г.*

*Приета: 29.07.2019 г.*

## ИЗСЛЕДВАНЕ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧНИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА СТАБИЛИЗИРАНИТЕ С МОДИФИЦИРАНИ ХИДРАВЛИЧНИ СВЪРЗВАЩИ ВЕЩЕСТВА МАТЕРИАЛИ

**В. Николов<sup>1</sup>, А. Михов<sup>2</sup>**

*Ключови думи: стабилизация, хидравлични свързващи вещества*

### РЕЗЮМЕ

В рамките на настоящата статия, разработена със съдействието на ЦНИП към УАСГ, са изследвани най-разпространените у нас почви, стабилизирани със свързващи вещества на варова и на циментова основа и техни смеси за установяване на влиянието им върху основни физико-механични показатели с цел оптимизиране на ефекта от прилагането им.

### 1. Въведение

Добре развитата пътна инфраструктура е от първостепенно значение за икономическия растеж и социалното развитие на България. От своя страна увеличените търговски превози водят до значително натоварване на пътната мрежа, при това най-вече от тежкотоварни превозни средства. Това поставя значително по-високи изисквания, както към рехабилитацията на съществуващата пътната мрежа, така и при строителството на нови пътни участъци. Заедно с това стремежът за по-бързо изпълнение на строителните дейности и изискванията за устойчива и екологична ангажираност в строителния процес обуславят търсенето на иновативни технологии и материали за изпълнението на инфраструктурните проекти.

---

<sup>1</sup> Валентин Николов, доц. д-р инж., кат. „Пътища”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: nikolov\_hpc@abv.bg

<sup>2</sup> Александър Михов, инж. докторнт, кат. „Пътища”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: aleksandar.mihov@gmail.com

Основните и подосновните пластове в пътните настилки, както и земната основа, имат решаващо значение за поемане и разпределяне на възникващите напрежения, породени от подвижните товари. Поради своята функция те изискват и значителен ресурс от скални материали, притежаващи определени физико-механични характеристики.

За постигането на по-добра икономическа ефективност и екологичност при изпълнението на основни и подосновни пластове в пътните конструкции се цели използване на наличните почви и скални материали, дори когато не отговарят на определени изисквания. Тяхната устойчивост, особено при изграждането на пътища, изисква целенасочено въздействие върху механичните им свойства. За тази цел е необходимо да бъдат обработени с подходящи свързващи вещества, което води до подобряване на тяхната механична устойчивост и дълготрайност. В световната пътно-строителна практика тази технология се е наложила под понятието стабилизация.

Обработката на почва и/или зърнести материали със стабилизиращи вещества води до формирането на т.нар. свързан пласт. Стабилизиращият основен пласт притежава повишена носещата способност поради разпределянето на напреженията на по-широка повърхност и значително намалена склонност към деформации поради свойството му да понася значителни опънни напрежения. При тази технология се постигат значително по-тънки конструктивни пластове в настилката, което е причина за високата икономическа ефективност на метода. Този вид пластове са слабо водопропускливи, поради което притежават много добра устойчивост на замразяване и размразяване, което осигурява по-дълъг жизнен цикъл на цялата пътна конструкция.

Краткосрочните и дългосрочните свойства на тези материали се различават съществено в зависимост от фактори като вида и количеството на стабилизиращия агент, конструкцията на настилката, условията на околната среда по време на строителството, както и през целия период на експлоатация.

Изборът на най-подходящо свързващо вещество е от съществено значение за качеството на изпълненото строителство, както и за икономическата ефективност. В зависимост от качествата на стабилизиращия материал и целта на обработката е възможно използването на различни по вид и клас по якост свързващи вещества. Чрез добавяне на хидратна вар е възможно намаляване на влажността и подобряване на обработваемостта на стабилизиращия материал, което от своя страна води до намаляване на пластичността и увеличаване на кохезията му. Този вид стабилизации е изключително подходящ за високо пластични глини. От своя страна стабилизацията с хидравлични свързващи вещества, произведени на основата на циментов клинкер, води до значително увеличаване на якостните и деформационните характеристики на обработвания материал. В зависимост от целта и качествата на обработвания материал е възможно чрез точно дозиране на свързващи вещества на основата на портланд циментов клинкер и активен калциев оксид получаването на продукт, обединяващ качествата на двата продукта. Използването на този вид модифицирано свързващо вещество ще позволи стабилизация на материали с характеристики, неприложими за пътно строителство, и същевременно подобряване на икономическата ефективност на технологията.

## **2. Състояние на проблема**

### **2.1. Основни видове и принципи на стабилизираните материали**

Стабилизация в пътното строителство представлява обработката на почва и/или зърнести материали със свързващи вещества и вода и уплътняването им като пласт от

пътната конструкция. Въпреки че като химичен процес стабилизацията наподобява конвенционалния бетон, се наблюдават значителни разлики в консистенцията на материала, количеството и вида на свързващото вещество, цялостната технология на изпълнение, якостните и експлоатационни изисквания.

Проектирането на стабилизираните смеси се извършва въз основа на земно-механичните принципи. Свойствата и характеристиките на стабилизираните смеси зависят от четири основни параметъра: състава на почвения материал (глина, пясък, чакъл или комбинация); количеството и вида на свързващото вещество в сместа; водното съдържание в сместа по време на уплътняване и условията на отлежаване (влажност, температура и време); и степента на уплътняване. Чрез изготвянето на оптимална рецепта за стабилизация е възможно подобряването на налични непригодни за строителни цели материали до такава степен, че да бъдат изпълнени изискванията за дълготрайност и якост. Въпреки това характеристиките на стабилизираните материали обикновено са недостатъчни за създаване на трайна износостойчива повърхност, поради което много често върху готовия пласт е необходимо полагането на бетоново или асфалтово покритие.

## 2.2. Принцип на действие на стабилизираните материали

При стабилизацията със свързващи вещества изходният материал е трифазна смес. Състои се от твърди частици, вода и въздух. Земно-механичните свойства на обработвания материал се определят от зърнометричния състав, формата на зърното, обемната плътност (съдържание на пори, водно съдържание) и минералния състав.

Най-често смесените или финозърнестите почви се стабилизират със свързващи вещества, докато грубите зърнести материали се уплътняват по конвенционални методи. Структурата на почвата и нейният минерален състав са определящи за химичните и физичните ефекти на стабилизацията. Песъчливите и глинестите фракции имат най-голямо влияние върху механичните характеристики на почвата. Параметри и критерии за приложимост са не само зърнометричният състав, но също пластичните свойства, абсорбционните свойства, устойчивостта на набъбване, т.е. всички свойства, произтичащи от структурата на най-фините частици. Различното поведение на финозърнестите почви и техните специфични реакции със свързващите вещества произтичат от минералогичния състав на сместа [3, 4]. Частиците, утаени след ареометров анализ с размери до 2  $\mu\text{m}$ , са образувания от отделни глинести частици, които, в зависимост от минерала, са съставени от до 80 силикатни слоя. Тези слоеве на свой ред се състоят от тетраедри и октаедри. В зависимост от последователността се разграничават двуслойни и трислойни минерали, както и смесени слоести структури. Дву- и трислойните минерали се различават значително по своите химико-физични свойства, което от своя страна се отразява в характерните механични свойства на почвата. От една страна, това поведение се определя от силите на свързване между слоевете и частиците, т.е. Ван дер Ваалсови сили, сили на водородни връзки и диполни взаимодействия. От друга страна, специфичната повърхност, която се увеличава квадратично с намаляване на размера на зърната, силно влияе върху водния баланс и механичното поведение [3, 4].

При промяна в състава на водата, съдържаща се в порите и особено при действие на свързващото вещество, е възможно обмяната на катионите в междинните слоеве да повлияе на свързващия капацитет на водата и на пластичните свойства на почвата. Осмотичните свойства на глинестите минерали имат основно значение за набъбването и за пластичните свойства. Други промени в земно-механичното поведение на почвата могат да бъдат резултат от изменение в минералния състав в следствие на изветряне или механично въздействие.

Всички тези процеси възникват с увеличаване на съдържанието на фини частици в почвата. Почви с преобладаващо съдържание на кварц, като например прахови пясъци или дори чисти пясъци и чакъли, са слабо повлияни от добавянето на свързващо вещество. При такива почви основно значение има структурата на скелета и следователно уплътняването. По отношение на якостта на натиск на срязване и съсъхване на стабилизирани почви, максимално уплътнение се постига с по-ниско от оптималното водно съдържание, докато по-ниска водопропускливост в комбинация с по-високото налягане в порите се постига при по-висока влажност.

## **2.3. Видове стабилизации**

В зависимост от вида на свързващите вещества, обработвания материал, физико-механическите изисквания към изграждания конструктивен пласт и положението му в пътната конструкция се различават два основни типа на стабилизация: подобряване и заздравяване. Ефектът от обработката може да варира в зависимост от използваните свързващи вещества.

### **2.3.1. Подобряване на конструктивните пластове**

В пътното строителство често се налага изграждането на пътни участъци в зони с неблагоприятни геоложки условия. При наличие на глинести почви с висок индекс на пластичност и високо водно съдържание се наблюдава влошена устойчивост на климатичните въздействия, както и невъзможност за постигане на необходимото уплътнение и носимоспособност на изгражданите пластове. Тези почви могат да бъдат влагани в пътната конструкция след предварителна обработка – т.нар. „подобряване“. Подобряването на почвите цели оптимизиране на обработваемостта и уплътняемостта на почвите. Подобряването на физико-механичните свойства включва намаляване на пластичността и повишаване на уплътняването и якостта на материала.

### **2.3.2. Заздравяване на конструктивни пластове**

Заздравяване на пластове в пътните настилки е обработката на почвен и/или скален материал със свързващи вещества с цел повишаване на носимоспособността и дълготрайността им. Заздравените основни и подосновни пластове на настилката имат повишена якост, устойчивост на умора и климатични въздействия. Обработката на материала се извършва на обекта или в смесителна инсталация, като към зърнометричния състав на материала има строги изисквания, което често води до необходимост от подобряването му.

## **2.4. Ефект от стабилизацията на основни и подосновни пластове**

### **2.4.1. Разпределяне на натоварванията**

Стабилизирани основни и подосновни пластове притежават много по-голяма коравина в сравнение с нестабилизирани. По-високата коравина на свързания пласт позволява разпределяне на натоварвания върху по-широка повърхност, намалявайки напреженията, достигащи до земната основа, което води до повишаване на носимоспособността на горните пластове и на цялата пътна конструкция.

## 2.4.2. Предотвратяване на възникването на коловози

Поради по-високата коравина на стабилизирани пластовете и разпределянето на натоварванията на по-широка повърхност се предотвратяват сляганята на основните и подосновните пластовете в областта на коловозите. Освен това, поради повишената носимоспособност на конструкцията на настилката, асфалтовите пластовете се изпълняват с по-малка дебелина, което пък от своя страна води до ограничаване на възникването на коловози в самите повърхностни пластовете.

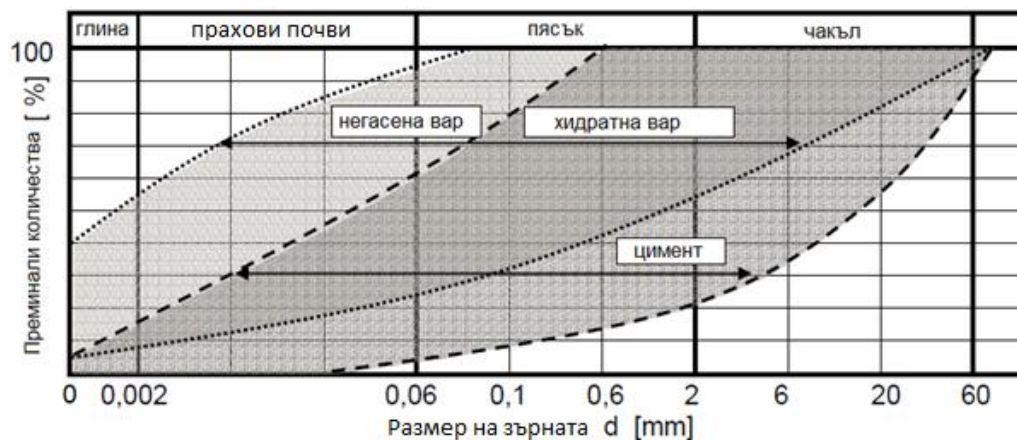
## 2.4.3. Намалява чувствителността към вода

Основните и подосновни пластовете, обработени със свързващи вещества, притежават сравнително плътен скелет, който ограничават пропускането на вода. Това свойство на стабилизирани материали не позволява проникването, както на почвени, така и на повърхностни води в пътната конструкция и по този начин се предотвратяват повреди, породени от замръзване. Стабилизирани материали образуват свързан пласт, който притежава значителна здравина и дори при овлажняването му осигурява необходимото разпределение на натоварванията, породени от подвижните товари.

## 2.4.4. Ограничават деформациите

По-високата коравина на стабилизирани основни и подосновни пластовете ограничават деформациите, породени от подвижните товари. Това води до по-малка умора на материалите и по-дълъг живот на цялата пътна конструкция.

## 2.5. Видове и действие на стабилизиращите агенти



Фиг. 1. Емпирични граници на приложение на свързващите вещества [10]

Най-често при стабилизацията на основни и подосновни пластовете в пътното строителство като стабилизиращи агенти се използват негасена вар, хидратна вар, цимент и различни техни модификации. Основният критерий при избора на подходящо свързващо вещество обикновено е зърнометричният състав и водното съдържание на почвата. На фиг. 1 са представени емпирично установени препоръчителни граници за избор на свързващи вещества. При всички случаи за избора на свързващо вещество е необходимо първо да се дефинират техническите изисквания и целта на стабилизацията, след което

се проучва с какви средства и до каква степен съответните свойства и параметри на почвата могат да бъдат подобрени. За тази цел трябва да се има предвид наличната почва с нейните характеристики и земно-механичните изисквания към пътната конструкция.

Изборът на оптимално свързващо вещество и процесът на смесване не трябва да се основава на предпочитания или изпълнени предишни обекти. Наличният изходен материал трябва да бъде изследван и оценен от гледна точка на земно-механични характеристики и минералогия. След това се извършва задълбочено изследване на основните механични характеристики на стабилизиранията почва, якост на натиск и срязване, набъбване или свиване, устойчивост на умора. Въз основа на събраната информация се определят видът, средствата и рецептата за стабилизация.

### 2.5.1. Свързващи вещества на циментова основа

За стабилизирание на почвите с хидравлични свързващи вещества на циментова основа се използват предимно Портланд цименти, които се хидрофобизират с цел контролиране на времето на свързване. Основните химични елементи са трикалциев силикат ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) – алит, дикалциев силикат ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) – белит, трикалциев алуминат ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ) – целит и тетра-калциев алумоферит ( $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) – ферит. При контакт с вода се осъществява хидратиране на тези компоненти, при което възникват хидратирани калциеви силикати, калциеви алуминати и като вторичен продукт калциев хидроксид ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) – портландид. Първите два продукта образуват в порестото пространство кристални калциеви хидросиликати, които свързват почвените частици в скелет. По време на хидратацията на цимента рН на водата в порите се повишава рязко. Като вторичен ефект се наблюдава разтваряне в почвата на силикатите и алуминатите от глинестите частици или от аморфните материали на повърхността на частиците. С калция протичат допълнителни реакции, които водят до процеси на втвърдяване и промяна в структурата на почвения скелет. Тези бавно протичащи процеси се наричат пуцоланови реакции [1].

Реакцията на цимента в почвата е много сложна и се различава от хидратацията на цимента в бетона по включването на глинести частици. Характерно е първичното образуване на скелет в порестото пространство с бързо и силно увеличаване на якостта. Вторичният ефект предизвиква стабилизирание и циментирание на почвените частици или конгломерати, т.е. трайна структурна промяна, която като вторичен ефект повлиява на деформируемостта и водното съдържание. Първичната реакция се контролира от количеството на цимента и наличната вода в порите, докато вторичната реакция зависи от минералния състав на почвата.

В органичните почви циментовата реакция е възпрепятствана от хуминовите киселини. В сулфатни (гипс) или сулфидни (пирит) почви повишаването на якостта се нарушава от увеличаването на обема по време на образуването на еtringит. Тези наблюдения са потвърдени и в [6]. Ако еtringитът се образува преди уплътняване, свързващото вещество не се използва оптимално. Последващото образуване на еtringита води до огромно налягане вследствие от набъбване (до 5 МПа) т.е. увеличаване на обема и разрушаване на скелета [6].

Земно-механичните характеристики на стабилизиранията почви не могат да бъдат установени предварително. Преди влагането на всеки един вид почва е необходимо изследване на приложимостта. Фактори, влияещи върху реакцията, са зърнометричен и минерален състав на почвата, видът и количеството на цимента, съдържанието на вода в порите, смесването, уплътняването и последващата обработка.

В табл. 1 са дадени емпирично установени количества за свързващи вещества на циментова основа, необходими за подобряването на различни видове почви. С използва-

нето на хидрофобизиран цимент в възможно постигането на оптимизация в процеса на стабилизация.

**Таблица 1. Ориентировъчни количества при стабилизация с циментови свързващи вещества**

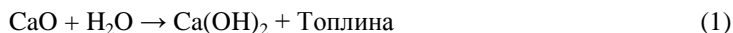
A-1	A-3	A-2	A-4	A-5	A-6	A-7
2%	→	4%	→	6%	→	8% → >15%

Стабилизацията с циментови свързващи вещества намира значително приложение за изпълнение на основни пластове в пътните настилки. Така изпълнените свързани пластове притежават свойството за по-добро разпределяне на натоварванията и същевременно имат добра устойчивост на деформации и замръзване. Чрез циментовите свързващи вещества се постига бързо повишаване на якостта на натиск и срязване на обработения материал.

### 2.5.2. Свързващи вещества на варова основа

При стабилизацията на почвите със свързващи вещества на варова основа се наблюдават процеси на осушаване на почвата, свързване на твърдите частици на почвата, йонен обмен и пуцоланови реакции. Като дългосрочен ефект може да се появи и карбонизация. За подобряване на свързаните почви се използват негасена вар – CaO, хидратна вар – Ca(OH)<sub>2</sub> или хидравлична вар в зависимост от целта на обработката.

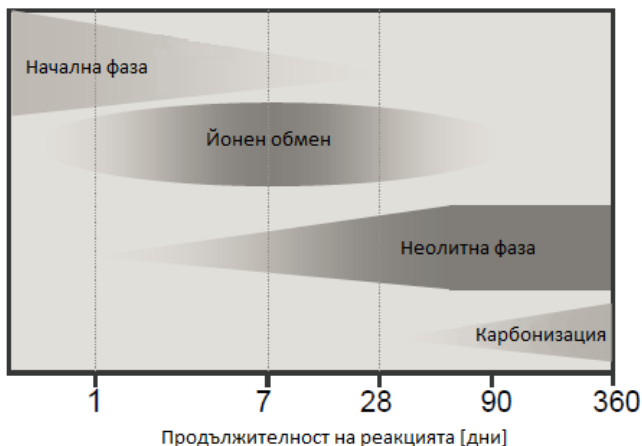
Негасената, известна също като бяла вар, се използва, когато е необходимо осушаване на почвата. Допълнителен ефект на осушаване има изпаряването на вода от порите вследствие на топлинната реакция и аерирането по време на смесването. Установено е, че съдържанието на вода в почвата намалява със същия процент на добавената негасена вар.



Образуването при гасенето калциев хидроксид (уравнение 1) или директно смесената хидратна вар, разтворена във вода (уравнение 2), повишава концентрацията на електролита и рН на водата в порите, така че SiO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> от глинестите частици биват разтворени. Наблюдава се ефект на йонен обмен, образуване на водородни връзки и пуцоланови реакции (ур. 3 и 4). Това води до желаното подобрение на механичните свойства на почвата [10, 11].

На фиг. 2 е показана фазовата последователност при стабилизация с вар. Началната фаза се характеризира с промяна във водното съдържание, повишаване на смукателното налягане и образуване на почвени конгломерати. Още на този етап започва йонният обмен, натрият и други катиони се заменят с калций. В резултат на смукателното налягане и променените връзки между частиците се наблюдава промяна в структурата: праховите и глинестите частици се обединяват в по-големи зърна. От гледна точка на земната механика, това води до увеличаване на границата на източване  $w_p$ , намаляване на индекса на пластичността  $I_p$  и по този начин увеличаване на показателя на консистенция

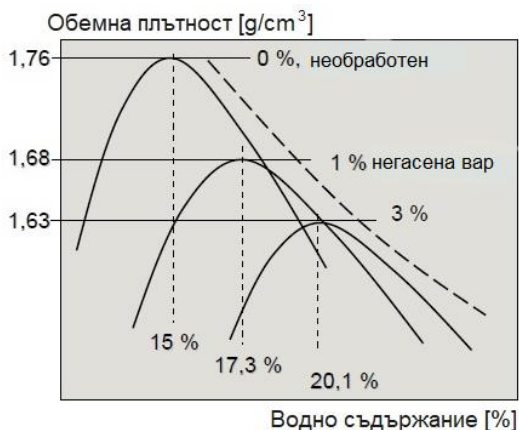
Ис. Това води до изместване на прокторовата крива, при което обемната плътност на скелета намалява и оптималното водно съдържание се увеличава, както е показано схематично на фигура 3 за изследвана лъсцова почва. Първоначалното свързване на почвени частици, дължащо се на стойността на рН, зависи предимно от съдържанието фини частици в почвата и от количеството добавена вар. Този ефект се изчерпва с количество вар от 2 до 3%. Hilt и Davidson [8] установяват емпирично граница на количеството вар, от която не се очаква по-нататъшно увеличаване на границата на източване. Тази връзка е приблизително потвърдена за хидратна вар и от други литературни източници [7, 9].



Фиг. 2. Фазовата последователност при стабилизация с вар

Оптимално съдържание:

$$M_{Ca, opt} [\%] = 0,03 \times \text{Съдържание на глинести частици} [\%] + 1,25 \quad (5)$$



Фиг. 3. Влияние на добавената вар върху обемната плътност на скелета и оптималното водно съдържание [10]

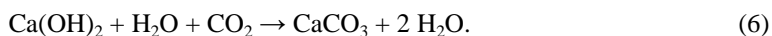
След началната фаза се наблюдава ефект на йононен обмен, дължащ се на минералния състав на почвата, т.е. фаза на катионен обмен. Пуцолановите реакции на хид-



ратна вар със силикати и алуминати започват в така наречената неолитна фаза няколко дни след хидратация и продължават от 1 до 5 години. Силикатите или алуминатите запълват в гелообразна форма порестото пространство, и посредством пуцолановите реакции водят до свързване на почвените частици и по този начин до увеличаване на якостните характеристики на почвата. Тези хидравлични реакции са сравними с тези на цимента, но са в пъти по-бавни. Ефектът зависи от количеството добавена вар и минералния състав на почвените частици.

При липса на активност на глинестите минерали не се наблюдава заздравяване на почвата. В този случай може да се използва хидравлична вар. Тя съдържа компоненти, които се втвърдяват при реакция с водата в порите и образуват връзки, подобни на циментовите.

Като допълнителен дългосрочен ефект Hilt и Davidson, както и в други източници е посочена карбонизацията, реакция на хидратната вар с калциевия карбонат от въглеродния диоксид на въздуха в почвата.



Тази реакция е неблагоприятна за строителни цели. Карбонатните кристали понякога не образуват връзки и водят до разрушаване на повърхността на стабилизирани пластове. При наличие на последващи пластове този дългосрочен ефект е незначителен, най-вече поради недостатъчно наличие на въздух в почвата.

Както при заздравяването с циментови свързващи вещества и при варта, водата в порите е необходима за протичане на реакциите. Докато свързването при цимента при не достатъчно вода необратимо спира, хидратирането на калциевия оксид и пуцолановите реакции при калциевия хидроксид се прекъсват временно или се забавят. Тъй като реакциите са свързани с увеличаване на обема, при по-късна активация, е възможно да възникнат набъбвания и разрушаване на конструкцията.

В редки случаи минералният състав на изходния материал не е известен. По тази причина и ефектът от стабилизирането му не може нито да бъде предсказан, нито да бъде установен чрез бързи изпитвания. За тази цел е необходимо провеждане на изпитвания за пригодност на материала.

В табл. 3 са дадени ориентировъчни стойности [7, 8] при стабилизация с варови свързващи вещества, като при всички случаи е необходимо изготвяне на рецепта за всеки конкретен обект.

**Таблица 3. Ориентировъчни количества при стабилизация със свързващи вещества на варова основа**

Подобряване на дребнозърнести и смесени почви	$w > w_{Pr}$	Негасена вар	2 до 3%
	$w \leq w_{Pr}$	Хидратна вар	2 до 3%
Заздравяване на дребнозърнести и смесени почви	$w > w_{Pr}$	Негасена вар	4 до 8%
	$w \leq w_{Pr}$	Хидратна вар	4 до 8%
Заздравяване на едрозърнести и смесени почви	-	Хидравлична вар	4 до 12%

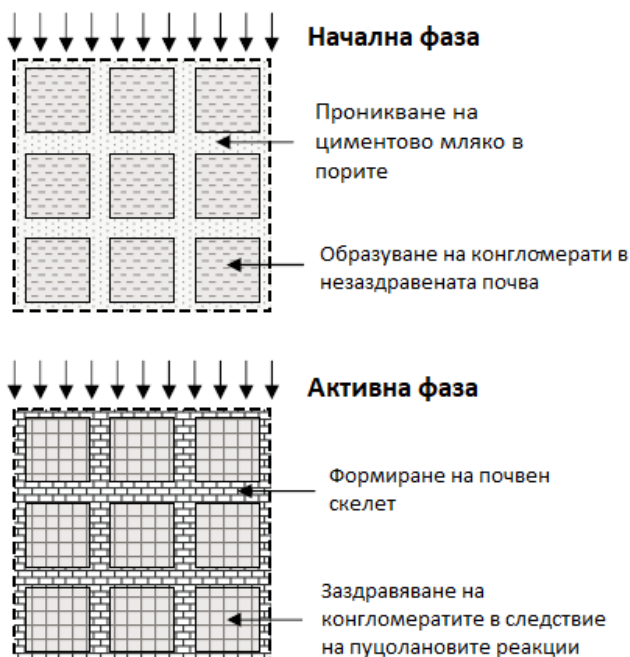
### 2.5.3. Смесени свързващи вещества

Земно-механичният ефект от подобряването и заздравяването на почви с циментови и варови свързващи вещества са резултат от различните реакции на свързващото вещество с почвените елементи. Ако се изисква бързо и значително заздравяване на поч-

вата с голямо увеличение на якостта на натиск и същевременно подобряване на еластичните и деформационни характеристики, най-често се използват циментови свързващи вещества. Между почвените частици се образуват връзки, които притежават значителна механична якост. За подобряването на фино зърнестите и високо пластични почви обаче често е необходимо добавянето на голямо количество свързващо вещество.

При необходимост от осушаване или подобряване на обработваемостта, уплатняемостта на свързани почви, например в земната основа или подосновен пласт на пътната конструкция, се изпълнява стабилизация със свързващи вещества на варова основа. Чрез този тип обработка се постига умерено повишаване на якостта, кохезията и устойчивостта на атмосферни влияния на изпълнения пласт. В резултат на това между почвените частици се образуват връзки, които се втвърдяват с времето и по този начин подобряват механичните свойства на почвата.

С помощта на модифицирани свързващи вещества, смеси от такива на варова и циментова основа, се обединяват предимствата им и се постига оптимизация на ефекта спрямо целта на обработката. Циментовият камък бързо заздравява почвения скелет, докато варта води до дългосрочно подобряване чрез намаляване на пластичността и осушаване на почвата. На фиг. 4 е показан модел за обяснение на взаимодействието между двата типа свързващи вещества. Почвените частици и скелетните връзки образуват свързан материал, при което чрез комбинацията на двата типа свързващи вещества се постига едновременно повишаване на якостните и на деформационните характеристики на материала. Предимството е в необходимостта от по-малко количество свързващото вещество и едновременно с това постигане на по-значим ефект от обработката.



**Фиг. 4. Модел на взаимодействието между варовите и циментовите свързващи вещества [10]**

В табл. 4 са дадени ориентировъчни стойности при стабилизация с различни комбинации на смесени свързващи вещества.

**Таблица 4. Ориентировъчни количества при стабилизация със смес от  
циментови и варови свързващи вещества**

	A-1	A-3	A-2	A-4	A-5	A-6	A-7
Вар/Цимент [%]	0/100	→	30/70	→	40/60	→	50/50 → 70/30

### 3. Експериментална част

#### 3.1. Цел на разработката

Целта на настоящия проект е изследването на свързващи вещества на варова и циментова основа и техни модификации и оценяване на влиянието им върху експлоатационното поведение на стабилизирани с тях материали, предназначени за изпълнение на свързани основни и подосновни пластове в пътните конструкции.

#### 3.2. Експериментален план

Във връзка с поставените цели бяха проведени лабораторни изпитвания на разпространени у нас почви, стабилизирани с различни видове свързващи вещества, за оценяване на ефективността от използването им самостоятелно и като смеси.

Като стабилизиращи вещества бяха използвани хидратна вар, Хидравлично свързващо вещество за пътища (HRB 12,5 – E2) комбинация по между им.

За определяне на ефекта от прилагането на избраните свързващи вещества бяха проведени лабораторни изпитвания на нестабилизирани и стабилизирани глинести, прахови и пясъчливи почви от групите А-3, А-4, А-6 и А-7 на груповата класификация на почви и на смеси от почви и зърнести материали съгласно АASHTO М 145, възприета в пътното строителство.

Изпитванията включваха определянето на основни от гледна точка на пътното строителство физико-механични показатели на изследваните почви (нестабилizирани и стабилизирани), а именно:

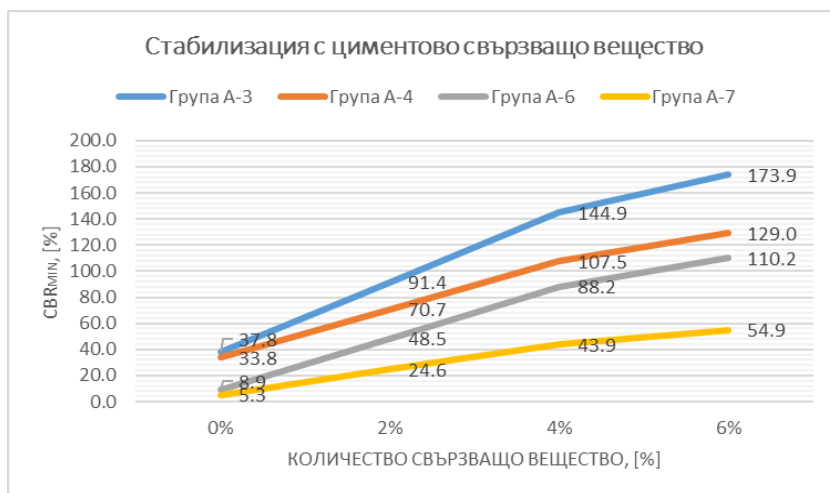
- зърнометричен състав, съгласно БДС EN ISO 17892-4;
- граница на протичане, съгласно Приложение № 15 от Наредба за проектиране на пътища № РД-02-20-2/2018;
- показател на пластичност, съгласно Приложение № 16 от Наредба за проектиране на пътища № РД-02-20-2/2018;
- максимална обемна плътност на скелета на материала (pds), съгласно БДС 17146;
- оптимално водно съдържание (wopt), съгласно БДС 17146;
- калифорнийски показател за носимоспособност след четириднешно киснене (CBR min), съгласно „Метод за определяне на калифорнийския показател за носимоспособността на почвата (CBR)” и относително линейно набъбване, съгласно „Метод за определяне на калифорнийския показател за носимоспособността на почвата (CBR)”, Приложение № 17 от Наредба за проектиране на пътища № РД-02-20-2/2018.

При проведените лабораторни изпитвания беше използвано различно количество на стабилизиращото вещество, в зависимост от вида на почвата.

### 3.3. Лабораторни изследвания

#### 3.3.1. Стабилизация със свързващи вещества на циментова основа

За глинести, прахови и пясъчливи почви от групите А-3, А-4, А-6 и А-7 на груповата класификация на почви и на смеси от почви и зърнести материали съгласно AASHTO M 145, нестабилизиран и стабилизиран с различни количества Хидравлично свързващо вещество за пътища (HRB 12,5 – E2) беше установен калифорнийски показател за носимоспособност след четиридневно киснене (CBR min).



Фиг. 5. Влияние на носимоспособността от количеството свързващо вещество

Фиг. 5 показва за избраните типове почви връзката между калифорнийски показател за носимоспособност след четиридневно киснене (CBR min) и количеството на циментово свързващо вещество в масови проценти към сухата маса на материала. При наличие на достатъчно вода в порите за протичане на хидратационни процеси, носимоспособността се увеличава почти пропорционално на количеството свързващо вещество. Наблюдаваният ефект на заздравяване е по-силно изразен при по-нископластичните материали, като например пясък и прахови почви, отколкото при високо пластичните глинестите пови. По принцип по-доброто уплътнение повишава носимоспособността. Същото се отнася и за уплътняването на стабилизираните почви. По тази причина всички пробни тела са уплътнени до максималната обемна плътност определена чрез модифициран Проктор. Съгласно закона на Абраам нарастването на якостта при други равни условия е обратно пропорционално на водо-циментното отношение.

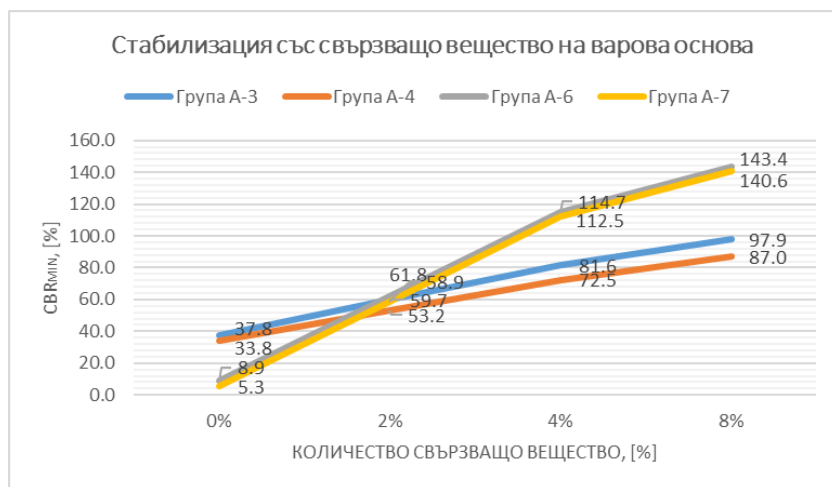
Подобно на носимоспособността, модулът на еластичност и кохезията в процеса на свързване се увеличават бързо. В проведените от Евстатиев изпитвания на сръзване е установено, че ъгълът на вътрешно триене остава почти непроменен при несвързани почви, докато при свързаните може да се увеличи с няколко градуса поради промяна в структурата след продължително отлежаване. Увеличаването на якостта, коравината и кохезията са следствие на образуването на скелет. При нарастване на деформациите тези

връзки са разрушават. Още с отделянето на свободна вар хидратацията на портландциментовия клинкер се наблюдават вторичните ефекти на пуцолановите реакции, които причиняват промяна в структурата само с леко повишаване на якостта на почвения скелет.

Общото схващане, че свързващите вещества на циментова основа са приложими само за несвързани почви, е неправилно. Несвързаните почви, поради по-голямата твърдост на образуваните връзки между зърна, и поради по-ниската специфична повърхност, както относителното, така и абсолютното заздравяване спрямо количеството свързващо вещество е по-високо, отколкото при свързаните почви. Относително увеличаване на якостта, коравината и кохезията може да се постигне и при леко, до среднопластични свързани почви, както и при високо пластични глини. Докато при пясъците и чакъла с добавяне на 3 до 5% свързващо вещество се постигат достатъчно високи якости, с увеличаване на съдържанието на фини частици се изискват по-големи количества свързващо вещество за постигане на необходимия ефект. При високо пластични глини до 4% добавено свързващо вещество има незначителен ефект (неактивна зона). При такива количества почвеният скелет остава непроменен. По-големи количества свързващо вещество (до около 20%) се наблюдава пропорционално увеличаване на якостта, коравината и кохезията (активната зона) дори и при глини. При по-нататъшното увеличаване на съдържанието на цимент повлияването на якостта е в много по-малка степен (инертна зона).

### 3.3.2. Стабилизация със свързващи вещества на варова основа

За същите глинести, прахови и пясъчливи почви, изследвани с циментови свързващи вещества, беше извършена стабилизация с различни количества хидратна вар и беше установен калифорнийски показател за носимоспособност след четириднешно киснене (CBR min).



Фиг. 6. Влияние на носимоспособността от количеството свързващо вещество

Фиг. 6 показва влиянието на различни количества хидратна вар при стабилизация на избраните почви и установения калифорнийски показател за носимоспособност след четириднешно киснене (CBR min). Носимоспособността се увеличава пропорционално на количеството свързващо вещество. В сравнение с резултатите от стабилизацията на прахови и пясъчливи почви с циментови свързващи вещества обаче, при варовите свързващи вещества, нивото на достигнатата носимоспособност е два пъти по-ниско за съответ-

ния период. Това се обяснява с механизма на реакция на варта, при който не се образува твърд скелет в порите. Ефектът на заздравяване при глинестите почви е много по значителен, което се дължи почти изцяло на описаните по-горе пуцоланови реакции, породени от минералния състав на почвените частици. По тази причина и постигнатият резултат зависи от обработваната почва. За почвените групи А-6 и А-7, както е показано на графиката, се наблюдава неравномерно нарастване на якостта. Това обаче не е ефект от намаляване на влиянието на съдържанието на свързващото вещество, а се дължи на различната скорост на реакцията.

От проведените изследвания за пригодност, както и от описаните в [6 и 8] дългогодишни изследвания, може да се види, че ефектът на стабилизиране на почвата с вар е дългосрочен. Развитието на якостта на едноосов натиск на стабилизирания с вар почви може да бъде установено с представената в уравнение 7 зависимост [8].

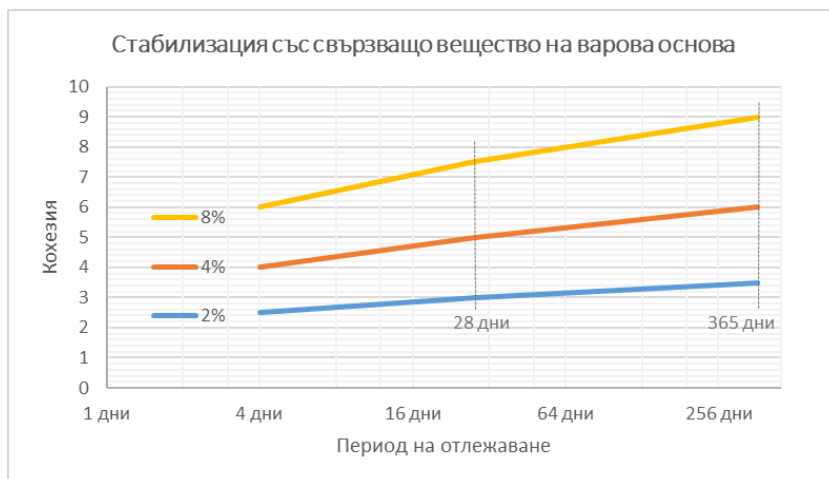
$$q_u(t_2) = q_u(t_1) A^* M_{Ca} \ln(t_2 / t_1), \quad (7)$$

където  $q_u(t_i)$  е якост на едноосен натиск към момент  $t_i$  [MPa];

$A^*$  – специфична почвена активност;

$M_{Ca}$  – добавено количество хидратна вар, отнесена към сухата маса [%].

Зависимостта може да се използва за прогнозиране на дългосрочните ефекти, като константата на специфичната за почвата активност  $A^*$  се определя от изследвания за пригодност на 7 и 28-ия ден. Стойността зависи основно от минералния състав на почвата. Други влияещи параметри са свойствата на свързващото вещество, температурата и условията на отлежаване, както и първоначалното уплътняване. В проведените в [8] изследвания на почва от група А-7 е изчислена стойността  $A^* = 0,02$ . Обичайно при варовите стабилизации на почви се постига 3- до 5-кратно подобряване на якостта на натиск, сравнено с необработения материал.



**Фиг. 7. Теоретично развитие на кохезията в зависимост от количеството свързващо вещество**

Подобни дългосрочни ефекти могат да се очакват и за развитието на кохезията и коравината на стабилизирания материал. Фиг. 7 показва прогноза за развитието във вре-

мето на кохезията, въз основа на изпитване на срязване на почва от група А-7 и прогноза на развитието ѝ чрез дадената зависимост. Също и при стабилизиране на фини и смесени почви с вар основно се повишава кохезията, като ъгълът на триене е слабо повлиян. При проблеми с носимоспособността в строителната практика трябва да се провери дали към изследвания момент е постигнато необходимото подобряване.

В много литературни източници [6, 7, 9] е изследвано влиянието на времето за отлежаване и степента на уплътняване на стабилизирана с различни свързващи вещества лъсоча почва. Както се очаква, най-добри резултати се постигат при отлежаване на изпитваните пробни тела във влажна среда. При отлежаване във вода се наблюдава краткосрочно забавяне в набирането на якостта. Този ефект се дължи на промяната в стойността на рН на водата в порите. Реакцията продължава, обаче, дори и под вода при стабилизирани с вар пробни образци. При различна степен на уплътняване се откроява по-крехко разрушаване при по-високи плътности. За разлика от хидравличните свързващи вещества, където се наблюдава значително повишаване на якостта на натиск с нарастване на плътността, при образци, стабилизирани с вар, с уплътнение между  $\rho_{d Pr} = 95\%$  до 100% не се забелязва значимо влияние на степента на уплътнение върху якостта.

### 3.3.3. Стабилизация със смесени свързващи вещества

В допълнение на изследването на материали, стабилизирани със свързващи вещества на варова и циментова основа, бяха търсени оптимални съотношения на смесване на двата типа свързващи вещества с цел подобряване на ефективността им. В рамките на проведените изследвания бяха изготвени различни смеси на хидравлични свързващи вещества, с които беше извършена стабилизация на почви от група А-4 и беше оценено влиянието им върху основни физико-механични показатели.

В табл. 5 са обобщени резултатите от изследванията на стабилизирана почва група А-4 с варови, циментови свързващи вещества и две комбинации по между им. Пробните тела са изготвени чрез уплътнение по модифициран Проктор в лабораторни условия, като са установени максимална обемна плътност на скелета на материала ( $\rho_{d Pr}$ ), оптимално водно съдържание ( $w_{opt}$ ), калифорнийски показател за носимоспособност след четиридневно киснене ( $CBR_{min}$ ) и относително линейно набъбване  $\delta$ .

**Таблица 5. Основни физико-механични показатели на стабилизирана почва от група А-4**

Стабилизирана почва група А-4		Изследвани показатели			
		$\rho_{ds}$	$w_{opt}$	$CBR_{min}$	Набъбване $\delta$
		[g/cm <sup>3</sup> ]	[%]	[%]	
Свързващо вещество	Необработена почва	1.86	13.3	33.8	1.2
	Вар - 4%	1.78	15.8	72.5	0.1
	Вар /HRB - 70/30 - 4%	1.79	14.8	130	0.1
	Вар /HRB - 30/70 - 4%	1.80	13.9	143.5	0.2
	HRB 12,5 - 4%	1.82	13.5	107.53	0.3

Както се очаква, беше постигнато значително по-голямо подобрене на носимоспособността на стабилизираните с HRB 12,5 образци в сравнение със стабилизиране с

вар. При намаляването на относителното линейно набъбване се наблюдава обратната зависимост, при която варта има по-добър ефект върху устойчивостта на замръзване на стабилизирани материали. При смесено свързващо вещество 30/70 (вар / HRB) са постигнати най-добри резултати за този вид почва. Едновременно е постигнато максимално подобрение на носимоспособността и същевременно значително подобрение в устойчивостта на набъбване.

Заздравяването на почвения скелет и повишаването на носимоспособността се дължи на свойствата на циментовото свързващо вещество, докато варта води до дългосрочно подобряване чрез намаляване на пластичността и осушаване на почвата.

#### **4. Изводи и заключения**

Настоящите изследвания бяха проведени с цел по-детайлно проучване на физико-механичните характеристики на свързващи вещества на варова и циментова основа и техни модификации и оценяване на влиянието им върху експлоатационното поведение на стабилизирани с тях материали, предназначени за изпълнение на свързани основни и подосновни пластове в пътните конструкции.

Въз основа на получените резултати от проведените изпитвания могат да се направят следните изводи:

- При стабилизацията на обследвани почвени групи (А-3, А-4, А-6 и А-7) със свързващо вещество на варова основа Калифорнийският показател за носимоспособност след 4-дневно киснене нараства за всички, като най-значителен е ефектът при глинестите почви от групи А-6 и А-7 – при тях увеличението е средно 15 – 20 пъти.
- При пясъчливите почви (група А-3) и при праховите почви (група А-4) по-добър ефект се получава при използване на хидравличното свързващо вещество на циментова основа HRB 12,5 (Е2).
- При стабилизацията на почви от група А-4 със смес от свързващи вещества на варова и циментова основа 70/30 относителното линейно набъбване намалява средно 12 пъти.
- Най-съществено повишаване на носимоспособността на стабилизирани почви от група А-4 е при обработка със смес от свързващи вещества на варова и циментова основа 30/70 – средно 4 – 5 пъти.
- Заздравяването на почвения скелет и повишаването на носимоспособността се дължи на свойствата на циментовите свързващи вещества, докато варта води до дългосрочно подобряване чрез намаляване на пластичността и осушаване на почвата.
- При увеличаване на съдържанието на свързващо вещество повлияването на физико-механичните характеристики на обработвания материал е в много по-малка степен: започва т.нар. инертна зона.
- При стабилизация със смесено свързващо вещество обработката на почвата се извърши в един технологичен процес (не е необходимо първоначално да се извършва обработка с вар за осушаване на почвата, а след това обработка с цимент), което води до ускоряване на строителния процес и подобряване на икономическата ефективност.



- Стабилизираните почви със свързващи вещества на варова основа са приложими за обработка високо пластични почви в теренна основа, за изграждане на насипното тяло (зони Б и В), на земно легло на пътни настилки (зона А).

Констатираните ефекти могат да бъдат обяснени с описаните по-горе механизми на действие. При смесените свързващи вещества, както и при стабилизациите с варови свързващи вещества, ефектът зависи изключително от минералния състав на почвата. Освен това не винаги целта на стабилизацията е да се постигне възможно най-високото подобрене на почвените характеристики. По-скоро наличните почви трябва да бъдат обработени до такава степен, че да отговорят на изискванията за носимоспособност и експлоатационна пригодност във всички фази на строителството и експлоатацията на изградената пътна конструкция. Освен познаването на почвата и нейното поведение, е необходимо ясно дефиниране на нормативни изисквания към готовата конструкция, като се вземат предвид всички параметри, свързани с експлоатацията. За удовлетворяването на всички технически и икономически изисквания е необходимо винаги изготвянето на рецепта, съдържаща технология и оптималните вид и количество на свързващо вещество. Перспектива за настоящето и продължаващите проучвания е подобряването на прогнозируемостта на почвените характеристики, както и ускоряването на изпитанията чрез установяване на функционални зависимости, целящи оптимизация на процеса по изготвянето на рецепта за стабилизация на различните видове почви и избора на оптимален вид свързващо вещество.

## Благодарности

Настоящата научноизследователска разработка по договор БН-214/2018 е подкрепена финансово от Център за научни изследвания и проектиране при УАСГ. Основна част от изследванията са извършени със съдействието на Геологическия институт към БАН.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Евстатиев, Д.* Формиране на якостта на циментопочвите. 1984.
2. *Николов, В.* Контрол на материалите за пътни настилки. 2014.
3. *Hartge, K. H., Horn, R.* Einführung in die Bodenphysik. 3. Aufl. 1999. Spektrum Akademischer Verlag Thieme, Stuttgart Enke, 1999.
4. *Hiltmann, W., Stribny, B.* Tonmineralogie und Bodenphysik. Springer Verlag, Berlin, 1998.
5. *Heilek, M.* Verfestigung von Böden mit Bindemitteln; Systematische Auswertung regionaler Erfahrungen. Diplomarbeit Bauhaus-Universität Weimar, Professur Grundbau, 2000.
6. *Bergado, D. T. et al.* Soft ground improvement in lowland and other environments. Chapter 6. ASCE Press, New York, 1996.
7. *Weber, A.* Verformungs- und Festigkeitseigenschaften von verbessertem Lößlehm. Diplomarbeit Bauhaus-Universität Weimar, Professur Grundbau, 2001.

8. *Hilt, G. H., Davidson, D. T.* Lime fixation in clayey soils, Bulletin No. 262, Highway Research Board, Washington DC, 1960, стр. 99-138.

9. *Jessberger et al.* Verfestigung und Verbesserung feinkörniger Böden mit Kalk im Ingenieurbau. Tiefbau Ingenieurbau Straßenbau TIS 7 (1988), стр. 380-384.

10. *Witt, K. J.* Mechanisms and effects in soil stabilization with binders.

11. *Tchakalova, B., Karastanev, D.* Geotechnical parameters of loess-cement mixture for construction of compacted soil-cement cushion, Geological Institute, Bulgarian Academy of Sciences, 2017.

12. УАСГ. Химия на строителните свързващи вещества.

## **STUDY OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF MATERIALS STABILIZED WITH MODIFIED HYDRAULIC BINDERS**

**V. Nikolov<sup>1</sup>, A. Mihov<sup>2</sup>**

*Keywords: stabilization, hydraulic binder*

### **ABSTRACT**

The present study, conducted with the assistance of the Centre for Research and Design at UACEG, tests the most common soils stabilized with lime and cement binders and their mixtures to determine their impact on basic physical and mechanical characteristics in order to optimize the effect from their application.

---

<sup>1</sup> Valentin Nikolov, Assoc. Prof. Dr. Eng., Dept. "Road Construction and Transport Facilities", UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: nikolov\_hpc@abv.bg

<sup>2</sup> Aleksandar Mihov, Eng., PhD student, Dept. "Road Construction and Transport Facilities", UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: aleksandar.mihov@gmail.com