

С. Костић, Н. Васовић, Д. Кузмановић - МЕХАНИКА СТЕНА И ТЛА СА ОСНОВАМА ГЕОМЕХАНИКЕ

УНИВЕРЗИТЕТ У БАЊОЈ ЛУЦИ
РУДАРСКИ ФАКУЛТЕТ



Срђан Костић, Небојша Васовић, Драгослав Кузмановић

МЕХАНИКА СТЕНА И ТЛА СА ОСНОВАМА ГЕОМЕХАНИКЕ

Београд / Приједор
2023.

Срђан Костић
Небојша Васовић
Драгослав Кузмановић

МЕХАНИКА СТЕНА И ТЛА
СА ОСНОВАМА ГЕОМЕХАНИКЕ

Београд / Приједор, 2023

Срђан Костић
Небојша Васовић
Драгослав Кузмановић

МЕХАНИКА СТЕНА И ТЛА СА ОСНОВАМА ГЕОМЕХАНИКЕ

РЕЦЕЗЕНТИ:

Др Небојша Гојковић, ред. проф.
Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду,

Др Владимир Малбашић, ред. проф.
Рударског факултета Универзитета у Бањој Луци.

ТЕХНИЧКА ОБРАДА:
Александар Анђелковић, техн.

Одлуком Научно-наставног већа Рударског факултета Универзитета у Бањој Луци бр. 21/3.601/23 од 8.9.2023 године, на основу позитивне рецензије, одобрено је штампање уџбеника „Механика стена и тла са основама геомеханике”, аутора Срђана Костића, Небојше Васовића и Драгослава Кузмановића.

ИЗДАВАЧ
Рударски факултет Универзитета у Бањој Луци,
Алеја Козарског одреда 1, 79101 Приједор
Република Српска, Босна и Херцеговина

ЗА ИЗДАВАЧА
Проф. др Свјетлана Средић, декан

ШТАМПА:
SR SILVER SCREEN, Београд

ТИРАЖ:
200 примерака

CIP - Каталогизација у публикацији
Народна и универзитетска библиотека
Републике Српске, Бања Лука

624.1(075.8)

КОСТИЋ, Срђан, 1986-

Механика стена и тла са основама геомеханике / Срђан
Костић, Небојша Васовић, Драгослав Кузмановић. - Приједор :
Рударски факултет Универзитета у Бањој Луци, 2023 (Београд :
Silver screen). - 488 стр. : илустр. ; 30 cm

Тираж 200. - Белешка о ауторима: стр. 487-488. -
Библиографија: стр. 479-486.

ISBN 978-99976-781-4-0

COBISS.RS-ID 139125761

Предговор

Књига „Механика стена и тла са основама геомеханике” представља први свеобухватни приказ својстава стена и тла са пратећим лабораторијским и теренским испитивањима на српском језику. Када се узме у обзир и део књиге којим су обухваћене основе геомеханике, књига се може сматрати потпуним уводом у физичко-механичку, теренску и геомеханичку својства стена и тла која предодређују напонско-деформацијско понашање терена у интеракцији са инжењерском активношћу, експлоатацијом минералних сировина, пројектовањем и извођењем конструкција.

Читаоцима се скреће пажња да је Механика стена и тла, у овој књизи, третирана у ужем смислу, како се обично третира на високошколским установама рударско-геолошког усмерења на простору Србије, Републике Српске и бивше Југославије. То значи да књигом нису обухваћени прорачуни напонско-деформацијског понашања стена и тла у садејству са било којим обликом инжењерске активности, што је предмет изучавања посебне научне дисциплине („Геомеханике”). Пракса да саставни део књиге о механици стена и тла буду и геостатички прорачуни, која је најчешћа на високошколским установама грађевинског усмерења, није усвојена у овој књизи из два разлога:

- (1) Наставним планом и програмом, геостатички прорачуни се изучавају у оквиру посебног предмета („Геомеханика”).
- (2) Аутори сматрају да је за студенте рударско-геолошког усмерења од посебне примарне важности овладавање знањем о физичко-механичким и теренским својствима стена и тла (и пратећим опитима) и да се то знање касније користи као основа за геостатичке прорачуне.

Књига је првенствено намењена студентима Рударског факултета Универзитета у Бањој Луци, из предмета „Механика стена и тла” и „Геомеханика”. Књига је конципирана тако да, осим наставних јединица обухваћених планом и програмом предмета, укључује и потребне елементе основа петрологије, хидрогеологије, инжењерске геологије и отпорности материјала, тако да је могу користити и студенти других техничких факултета и усмерења: геолошког, грађевинског, архитектонског, шумарског, и др.

Књига је богато илустрована фотографијама, табелама, дијаграмима и бројним примерима из инжењерске праксе, тако да може да буде од користи и инжењерима у обављању свакодневних задатака. Аутори су се трудили да књигом обухвате сва могућа својства стена и тла која се сусрећу у инжењерској пракси.

Као основа за писање књиге послужили су класични уџбеници „Механика тла у инжењерској пракси” (Обрадовић, Најдановић, 1999), „Механика тла” (Максимовић, 2008), „Основне механике стена” (Кујунџић, 1962) као и Збирке југословенских стандарда из области геотехнике.

Аутори се захваљују рецензентима проф. др Небојши Гојковићу са Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду и проф. др Владимиру Малбашићу са Рударског факултета Универзитета у Бањој Луци, који су прочитали материјал у рукопису и дали корисне сугестије за унапређење текста.

У Београду / Приједору, 5.9.2023.г.

Аутори

Садржај

Глава 1	Увод	1
1.1	Механика тла	2
1.2	Механика стена	4
Глава 2	Основне класификације стена и тла	7
2.1	Опште о стенама	7
2.2	Основна петролошка класификација	7
2.2.1	Магматске стене	7
2.2.2	Седиментне стене	12
2.2.3	Метаморфне стене	19
2.3	Инжењерскогеолошка класификација стена	21
2.4	Инжењерскогеолошка класификација тла	22
2.5	Геомеханичка класификација тла	23

Глава 3	Физичка својства стена и тла	27
3.1	Гранулометријски састав тла	27
3.2	Запреминска тежина стена и тла	29
3.3	Специфична тежина стена и тла	30
3.4	Порозност стена и тла	31
3.5	Влажност тла	33
3.6	Упијање воде код стена	34
3.7	Консистенција тла	35
3.8	Колоидална активност тла	39
3.9	Отпорност стена и тла на дејство мраза	39
3.10	Водопропусност тла	42
3.11	Капиларност тла	44
3.12	Бубрење тла	47
3.13	Лепљивост тла	50
3.14	Сукција у тлу	51
Глава 4	Механичка својства тла	55
4.1	Збијеност тла	55
4.1.1	Збијеност невезаног тла	55
4.1.2	Збијеност везаног тла	56
4.2	Чврстоћа тла на притисак	57
4.3	Чврстоћа тла на смицање	57
4.4	Стишљивост тла	61
4.5	Консолидација тла	62
4.6	Параметри за описивање динамичких својстава тла	63
4.6.1	Секантни модул смицања	63
4.6.2	Максимални модул смицања	64

4.6.3	Коефицијент пригушења	65
4.7	Бушивост тла	68
Глава 5	Механичка својства стена	69
5.1	Чврстоћа стена на притисак	69
5.2	Чврстоћа стена на затезање	70
5.3	Чврстоћа стена на смицање	70
5.4	Индекс гачкасте чврстоће стене	77
5.5	Тврдоћа стена	78
5.6	Жилавост стена	79
5.7	Дробљивост стена	79
5.8	Хабање стена	80
5.9	Деформабилност стена	81
5.10	Бушивост стена	85
5.11	Отпор стена према минирању	86
5.11.1	Врсте експлозива	87
5.11.2	Разарање стена експлозивом	88
5.11.3	Средства за паљење мина	91
5.11.4	Принципи минирања отворене стенске масе	95
5.12	Растреситост стена	96
5.13	Отпор стенске масе према копању и резању	97
5.13.1	Отпор стенске масе према резању по Евансу	97
5.13.2	Отпор стенске масе према резању по Оренстајн и Копел методи	99
5.13.3	Отпор стенске масе према резању по методи резног клатна типа Ш00	100
5.13.4	Отпор стенске масе према резању по Зеленину	100
5.13.5	Отпор стенске масе према резању по Шепетовском	102
5.13.6	Отпор стенске масе према копању по Домбровском	102
5.13.7	Емпиријске релације за одређивање отпора стенске масе према копању	103
5.13.8	Отпор стенске масе према копању роторним багером	105
Глава 6	Теренска својства стена и тла	109
6.1	Генитет и тропија стена и тла	109
6.2	Испуцалост стена	110
6.3	Напонско стање у терену	114
6.3.1	Напони у стени	115
6.3.2	Напони у тлу	118
6.4	Класификације терена као радне средине	122
6.4.1	Класификација М. М. Протођаконова	123
6.4.2	Категоризација земљишта по грађевинским нормама <i>GN-200</i>	124
6.4.3	Класификација подземних ископа према <i>GN-206</i>	125
6.4.4	<i>Q</i> класификација стенских маса	127
6.4.5	Геомеханичка класификација стенских маса – <i>RMR</i> систем	134
6.4.6	<i>ARMR</i> класификација	137
6.4.7	<i>Q – slope</i> класификација	140
6.4.8	<i>SMR</i> класификација	144
6.4.9	<i>MRMR</i> класификација	145

Глава 7	Лабораторијска испитивања узорака тла	155
7.1	Одређивање гранулометријског састава тла	155
7.1.1	Метода сејања	155
7.1.2	Метода хидрометрисања	156

7.1.3	Комбинована метода	158
7.2	Одређивање запреминске тежине тла	158
7.2.1	Поступак са цилиндром	158
7.2.2	Поступак са потапањем узорка у воду	159
7.2.3	Поступак са потапањем узорка у живу	159
7.3	Одређивање запреминске тежине чврстих честица тла	159
7.4	Одређивање порозности тла и коефицијента порозности	160
7.5	Одређивање влажности тла	161
7.6	Одређивање садржаја сагорљивих и органских материја у узорку тла	161
7.6.1	Метода жарењем	161
7.6.2	Метода са водониксупероксидом	162
7.7	Одређивање садржаја карбоната у узорку тла	162
7.8	Одређивање Атербергових граница конзистенције тла	164
7.8.1	Одређивање границе течења тла помоћу Казаграндеове трскалице	164
7.8.2	Испитивање границе течења тла падајућим шиљком	166
7.8.3	Одређивање границе пластичности тла	167
7.8.4	Одређивање границе скупљања тла	167
7.9	Испитивање отпорности тла на мраз	168
7.10	Методe за мерење водопропусности тла	169
7.11	Испитивање капиларности тла	170
7.11.1	Опит одређивања капиларне висине директним мерењем	170
7.11.2	Опит одређивања капиларне висине помоћу капиларметра Бескова	171
7.12	Лабораторијски опити за испитивање услова збијености тла	172
7.12.1	Прокторов опит	172
7.12.2	Модификовани Прокторов опит	173
7.12.3	<i>CBR</i> опит	173
7.13	Испитивање чврстоће тла на притисак	174
7.14	Испитивање чврстоће тла на смицање	175
7.14.1	Опит директног смицања	175
7.14.2	Опит триаксијалне компресије	177
7.15	Испитивање чврстоће тла на притисак	181
7.16	Едометарски опит стишљивости тла	182
7.17	Испитивање консолидације тла	184
7.17.1	Одређивање коефицијента консолидације c_v	186
7.17.2	Одређивање индекса компресије	188
7.17.3	Одређивање напона преконсолидације	189
7.18	Лабораторијско испитивање бубрења	190
7.19	Испитивање лепљивости тла	191
7.20	Лабораторијско испитивање сукције у тлу	191
7.21	Испитивање динамичких својстава тла	193
7.21.1	Тест са резонантним стубом (<i>RCT</i> опит)	193
7.22	Опит цикличне триаксијалне компресије	197
7.23	Опит цикличног директног смицања (<i>CDSS</i> тест)	199
7.24	Одређивање Поасоновог коефицијента за тло	202
7.25	Оцена склоности тла ка појави ликвефакције	203
Глава 8	Лабораторијско испитивање узорака стена	207
8.1	Испитивање чврстоће стена на притисак	207
8.2	Испитивање чврстоће стена на затезање	208
8.3	Испитивање чврстоће стена на смицање	209
8.3.1	Испитивање чврстоће на смицање под углом	209
8.3.2	Испитивање чврстоће на смицање дуж пукотина – према препорукама <i>ISRMa</i>	210
8.3.3	Испитивање чврстоће каменог набачаја на смицање	213
8.4	Одређивање индекса чврстоће на узорцима стена	215

8.5	Лабораторијско одређивање модула еластичности - модул деформабилности	217
8.6	Испитивање отпорности узорака стена на мраз	219
8.7	Лабораторијско испитивање упијања воде код узорака стена	220
8.8	Испитивање тврдоће стена	220
8.9	Испитивање жилавости стена	222
8.10	Испитивање дробљивости стена	222
8.11	Испитивање хабања стена	223
8.11.1	Метода Лос Анђелес	223
8.11.2	Метода Бемеа	224
8.11.3	Поступак Девала	224
8.11.4	Поступак Третона	225
8.11.5	Микро-Девалов тест	225
8.12	Испитивање бушивости стена и тла	226
8.13	Испитивање отпорности према резању	226
8.13.1	Испитивање отпорности према резању по <i>O&K</i> методи	226
8.13.2	Испитивање отпорности према резању применом резног клатна типа <i>S</i>	226
8.13.3	Испитивање отпорности према резању применом резног клатна по методи Зеленина	227
8.14	Одређивање Поасоновог коефицијента за стене	227
8.15	Испитивање динамичких својстава на узорцима стена	229

Глава 9	Преглед теренских геомеханичких испитивања	235
9.1	Инжењерскогеолошко картирање језгра бушења	235
9.2	Теренски идентификационо-класификациони опити	237
9.2.1	Визуелно одређивање величине зрна шљунка и песка	237
9.2.2	Одређивање садржаја ситних фракција ($< 0,074\text{ mm}$)	237
9.2.3	Опит трешења	237
9.2.4	Опит помоћу сјаја	237
9.2.5	Теренска процена карбоната у тлу	237
9.2.6	Опит пластичности	238
9.3	Одабир и узимање узорака за лабораторијска испитивања	238
9.3.1	Одабир и узимање узорака тла	238
9.3.2	Одабир и узимање узорака чврстих стенских маса	240
9.4	Теренска мерења водопропусности стена и тла	242
9.4.1	Теренско испитивање водопропусности тла црпењем	242
9.4.2	Теренско испитивање водопропусности тла наливањем	243
9.4.3	Теренско испитивање водопропусности тла под притиском (<i>VDP</i>)	244
9.5	Теренско одређивање запреминске тежине тла методом калибрисаног песка	247
9.6	Пенетрациони опити у тлу	249
9.6.1	Опит статичке пенетрације	249
9.6.2	Опит стандардне пенетрације <i>SPT</i>	253
9.6.3	Опит динамичке пенетрације <i>DPH</i> , <i>DPSH</i>	256
9.7	Опит плочастим дилатометром у тлу <i>DMT</i> опит	258
9.8	Испитивање чврстоће на смицање тла опитом крилном сондом	259
9.9	Статички опити испитивања деформабилности стенских маса	261
9.9.1	Хидрауличка распињача	261
9.9.2	Хидраулички јастук	264
9.9.3	Пробна комора	267
9.9.4	Радијална преса	268
9.10	Опит дилатометром и пресиометром у бушотини	270
9.11	Опит кружном плочом	275

9.12	DCP тест	277
9.13	Опит са лаким падајућим тегом	279
9.14	Опит спиралном плочом (<i>SPLT</i> опит)	280
9.15	Испитивање чврстоће стена на смицање <i>insitu</i>	282
9.15.1	Теренски оглед смицања у великој размери	282
9.15.2	Теренски оглед смицања по пукотини	285
9.15.3	Теренски оглед клизања бетон-стена	286
9.16	Теренско испитивање отпорности стена на резање ватметарском методом	287
9.17	Методe регистравања напона и подземних притисака	288
9.17.1	Методe мерења примарних напона	288
9.17.2	Мерење секундарних напона	291
9.17.3	Мерење подземних притисака	293
9.18	Методe регистравања деформација контуре подземне просторије	296
9.18.1	Мерење померања контуре просторије у радијалном правцу (конвергенција)	296
9.18.2	Мерења радијалних померања до дубини масива	297
9.19	Методe мониторинга процеса и појава у терену	300
9.19.1	Инклинометар	300
9.19.2	Пијезометар	302
9.19.3	Геодетски репер	308
9.20	Методe инжењерске геофизике	310
9.20.1	Сеизмичка испитивања методом <i>downhole</i>	314
9.20.2	Сеизмичка рефракциона испитивања	315
9.20.3	Геоелектрично профилисање	316
9.20.4	Сеизмичко прозрачивање између бушотина	316

4

Моделска испитивања

319

Глава 10	Преглед испитивања на моделима	321
10.1	Увод	321
10.2	Фазе моделовања	321
10.2.1	Фаза 1 - Теренска истраживања и испитивања	321
10.2.2	Фаза 2 – Креирање модела	322
10.2.3	Фаза 3 – Валидација модела	322
10.2.4	Фаза 4 – Верификација модела	322
10.2.5	Фаза 5 – Примена у инжењерској пракси	322
10.3	Врсте моделовања	323
10.3.1	Физичко моделовање	323
10.3.2	Математички модели	328
10.3.3	Нумерички модели	333
10.4	Метода коначних елемената	333
10.5	Метода коначних разлика	338
10.5.1	Ојлерова метода према напред	339
10.5.2	Ојлерова метода према назад	339
10.5.3	Кренк-Николсонова шема	340

5

Основе геомеханике

343

Глава 11	Опште о деформацији и напону	345
11.1	Деформација	345
11.1.1	Дужинска деформација – дилатација	345

11.1.2	Попречна деформација - дилатација	346
11.1.3	Запреминска деформација	347
11.1.4	Угаона деформација – клизање	348
11.1.5	Веза између померања и компоненталних деформација	349
11.1.6	Равно стање деформације	352
11.1.7	Разлагање тензора деформације на сферни и девијаторски део	356
11.2	Напон	357
11.2.1	Нормални и смичући (тангенцијални) напони	360
11.2.2	Компонентални напони	360
11.2.3	Конвенција о знаку	361
11.2.4	Стање напона – специјални случајеви	363
11.2.5	Главни правци и главни напони	364
11.2.6	Практичан начин за одређивање главних праваца	365
11.2.7	Моров круг напона	365
11.2.8	Линеарно стање напона у тачки напрегнутог тела	367
11.2.9	Пример одређивања напона у инжењерској пракси	368
11.2.10	Везе између напона и запреминских сила	372
11.2.11	Просторно стање напона	373
11.2.12	Морови кругови при просторном стању напона	375
11.2.13	Главни напони смицања при просторном стању напона	376
11.2.14	Разлагање тензора напона у сферни и девијаторски део	376
11.3	Механичка својства материјала	377
11.3.1	Примена отпорности материјала у пракси	378
11.3.2	Фактор сигурности у геомеханици	379
11.3.3	Хуков закон	379
11.3.4	Везе између напона и деформације за произвољно оријентисан координатни триједар	380
Глава 12	Експериментално мерење деформација и одређивање напона	383
12.1	Екстензометријске методе	384
12.1.1	Механички мерни уређаји	384
12.1.2	Електроотпорне мерне траке	384
12.2	Напонско-оптичке методе	384
12.2.1	Метода кртих лакова	386
12.2.2	Динамичка испитивања	386
12.2.3	Методе аналогije	386
12.2.4	Електроотпорне мерне траке	387
12.2.5	Врсте мерних трака	388
12.3	Механички екстензометри	390
12.3.1	Тензометар	390
12.3.2	Деформетар	391
12.4	Фотоеластичност	392
12.5	Раванска фотоеластичност	392
12.5.1	Природа светлост	392
12.5.2	Линеарно поларизована светлост	392
12.5.3	Двојно преламање	394
12.5.4	Оптички пут	395
12.5.5	Дихроизам кристала. Полароиди	396
12.5.6	Пролаз поларизоване светлости кроз оптички анизотропну средину	396
12.5.7	Поларизатор и анализатор	398
12.5.8	Двојно преламање код оптички изотропних материјала при оптерећењу	399
12.5.9	Поларископ	399
12.5.10	Линеарни поларископ	399
12.5.11	Оптерећена плоча у линеарном поларископу	400
12.5.12	Кружни поларископ	402

12.5.13	Оптерећена плоча у кружном поларископу	402
12.5.14	Изоклине и изохроме	404
Глава 13	Геодинамичке основе геомеханике	409
13.1	Површинско распадање стенских маса	409
13.2	Ерозија падина	415
13.3	Речна ерозија	415
13.4	Карстна ерозија	420
13.5	Клижење	421
13.6	Одроњавање	425
13.7	Осипање	426
13.8	Дејство земљотреса	427
13.8.1	Елементи земљотреса	427
13.8.2	Врсте земљотреса	430
13.8.3	Јачина земљотреса	430
13.8.4	Распрострањење земљотреса	439
13.9	Ликвефакција у тлу	441
13.10	Техногени процеси и појаве у терену	443
13.10.1	Слегања услед подземне експлоатације	443
13.10.2	Потреси изазвани рударском активношћу	449
13.10.3	Потреси изазвани минирањем	456
Глава 14	Хидрогеолошке основе геомеханике	465
14.1	Видови подземних вода	466
14.2	Хидрогеолошке функције стенских маса	467
14.3	Издани	469
14.3.1	Хидрогеолошки профил терена	469
14.3.2	Врсте издани према структурном типу порозности	471
14.3.3	Врсте издани према хидрауличком механизму	472
14.3.4	Карстне издани	473
14.3.5	Прихрањивање и пражњење издани	474
14.4	Филтрациона стабилност тла	474
14.5	Филтрационе деформације тла	475
Литература		479
Белешка о ауторима		487