

PRIMIJENJENA MEHANIKA TLA

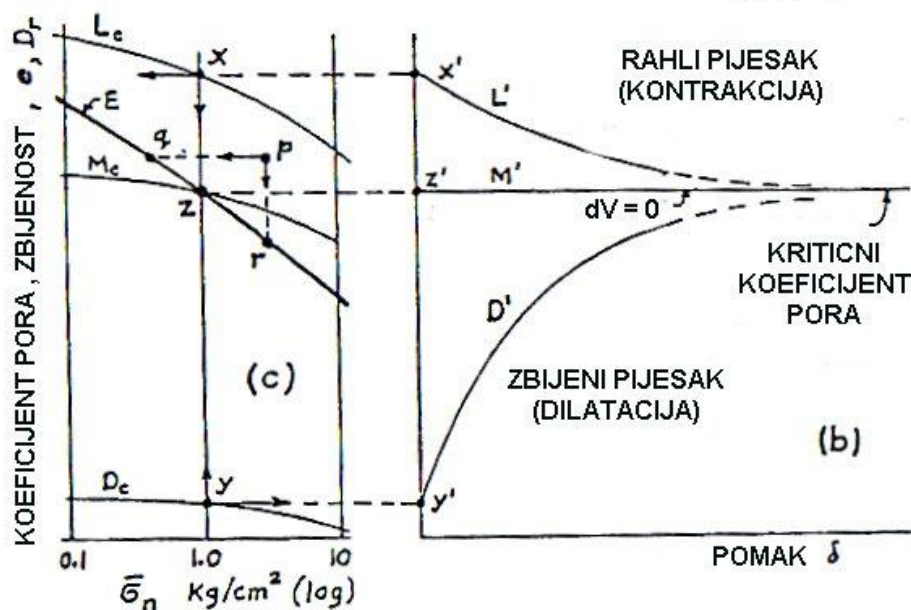
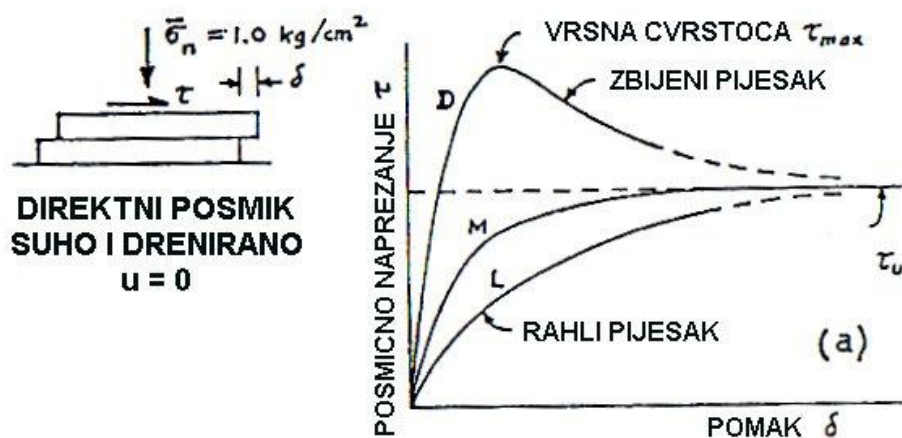
(II . predavanje)

SADRŽAJ

- ponašanje pijeska u uređaju za direktno smicanje
- ponašanje pijeska u troosnom uređaju (CID pokus)
- dilatacija
- kritično stanje
- vršna čvrstoća
- naponsko/deformacijska krivulja smicanja i redukcija krutosti
- krutost pri malim deformacijama
- rezultati CID pokusa za Erksak pijesak



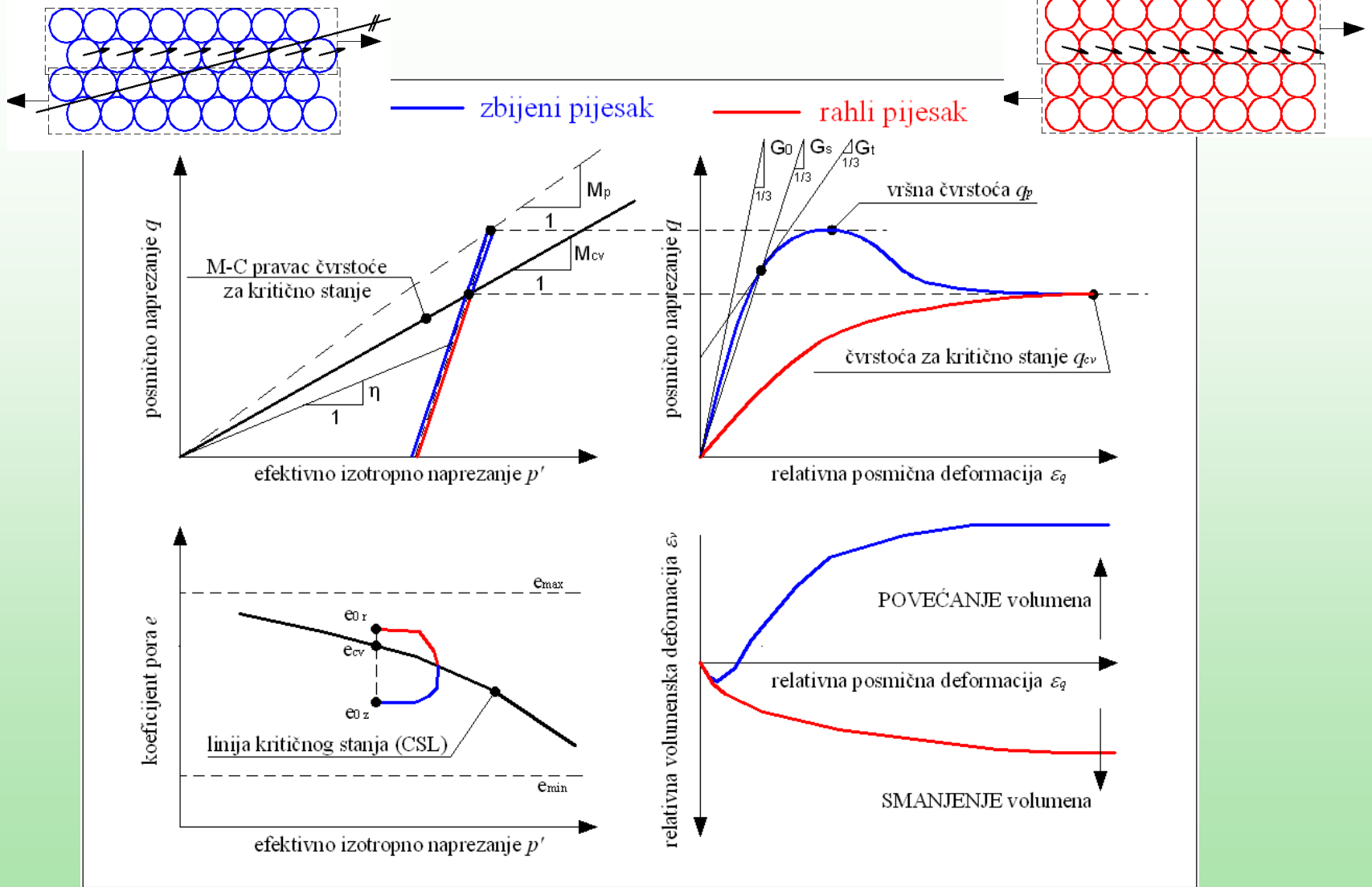
PONAŠANJE PIJESKA – direktni posmik



ISPITIVANJE DILATACIJE TLA U DIREKTNOM POSMIKU

Ispitivanje dilatacije pijeska u uređaju za direktni posmik prvi je ispitao Cassagrande (1936). Zbog pojave dilatacije, zbijeni uzorci pijeska povećavaju volumen uslijed smicanja, a rahli uzorci ga smanjuju. Ispitivanja pokazuju da uzorci pijeska različite zbijenosti, koji se smiču pri jednakom vertikalnom naprezanju, dolaze u slom približno pri jednakom koeficijentu pora. Pri velikim deformacijama koeficijent pora ostaje isti sa daljnjim smicanjem, uz isto posmično naprezanje, te kažemo da se pijesak nalazi u kritičnom stanju. Kritično stanje za različite vertikalne pritiske, može se prikazati krivuljom u $\sigma'_n - e$ dijagramu.

PONAŠANJE PIJESKA – CID pokus



PONAŠANJE PIJESKA – CID pokus

Osnovni elementi mehaničkog ponašanja pijeska mogu se zorno prikazati na rezultatima smicanja pijeska u tro-osnom CID pokusu. Shematski prikaz rezultata pokusa za zbijeni i rahli uzorak pijeska dan je na prethodnoj strani. Istraživanja pokazuju da prilikom smicanja pijeska dolazi do značajne promjene volumena ugrađenih uzoraka, pri čemu se početno zbijeni uzorci razrahljuju, a rahli uzorci zbijaju. Do promjene volumena dolazi zbog zrnate strukture pijeska za koju je karakteristično da prilikom smicanja nužno dolazi do preraspodjele zrna u zoni smicanja, čime se mijenja volumen početne strukture. Pojava se naziva dilatacija, a među prvima ju je na pijesku promatrao Reynolds (1885). Zbog djelovanja dilatacije zbijeni uzorci pijeska postižu veću čvrstoću nego rahli uzorci pri istom srednjem efektivnom naprežanju. Međutim pokazuje se da pri velikim deformacijama pijesaka u dreniranim uvjetima promjena posmičnih naprežanja jenjava (tečenje materijala), pijesak postiže konačnu čvrstoću koja ne ovisi o početnoj zbijenosti uzorka. Za zbijene pijeske ta je čvrstoća manja od vršne čvrstoće koju pijesak postiže pri znatno manjim deformacijama. Dodatno se pokazuje da u dreniranim uvjetima pri velikim deformacijama pijesak postiže konačnu zbijenost koja također ne ovisi o zbijenosti početnog uzorka, već samo o srednjem efektivnom naprežanju pri slomu.

PONAŠANJE PIJESKA – CID pokus

Ispitivanja pijeska u uvjetima različite zbijenosti i srednjeg efektivnog naprezanja pokazuju da je opisano stanje sloma jedinstveno za dani pijesak i može se opisati krivuljom u dijagramu koeficijent pora e – srednje efektivno naprezanje p' (Roscoe i dr. 1958). Takvo stanje naziva se kritičnim stanjem, krivulja kojom se ono opisuje linija kritičnog stanja (engleski: *Critical State Line* – *CSL*), a čvrstoća koju pijesak postiže u tom stanju čvrstoća za kritično stanje. Za kritično stanje karakteristično je da se pijesak u dreniranim uvjetima smiče pri konstantnom posmičnom naprezanju bez daljnje promjene volumena, što se na rezultatima CID pokusa očituje horizontalnom tangentom na krivulju smicanja i krivulju promjene volumena u točki kritičnog stanja (dijagrami q - e_q i e_v - e_q).

Stanje naprezanja u tro-osnom pokusu uobičajeno se prikazuje komponentama naprezanja, koje nezavisno utječu na promjenu volumena uzorka (srednje efektivno naprezanje p') odnosno na oblik uzorka (devijatorsko naprezanje q), a njihov omjer naziva se *omjer naprezanja* $\eta = q / p'$. Omjer naprezanja za kritično stanje označava se sa $\eta = M_{cv}$, a omjer naprezanja pri vršnoj čvrstoći $\eta = M_p$, pri čemu je vršna čvrstoća definirana kao maksimalna vrijednost devijatorskog naprezanja koju pijesak postiže u promatranom pokusu smicanja, q_p .

PONAŠANJE PIJESKA – CID pokus

Za različito srednje naprezanje, ovisno o zbijenosti, pijesak postiže različitu vršnu čvrstoću, koja se u polju naprezanja može opisati anvelopom čvrstoće. Oblik anvelope ovisi o zbijenosti pijeska odnosno dilataciji, čiji se iznos povećava sa zbijenošću pijeska.

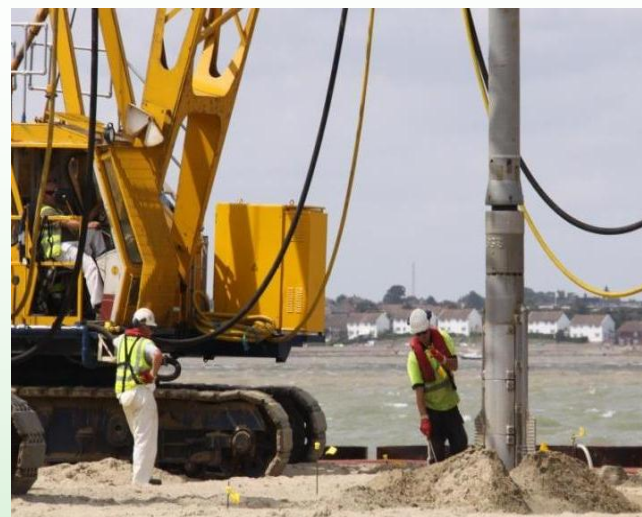
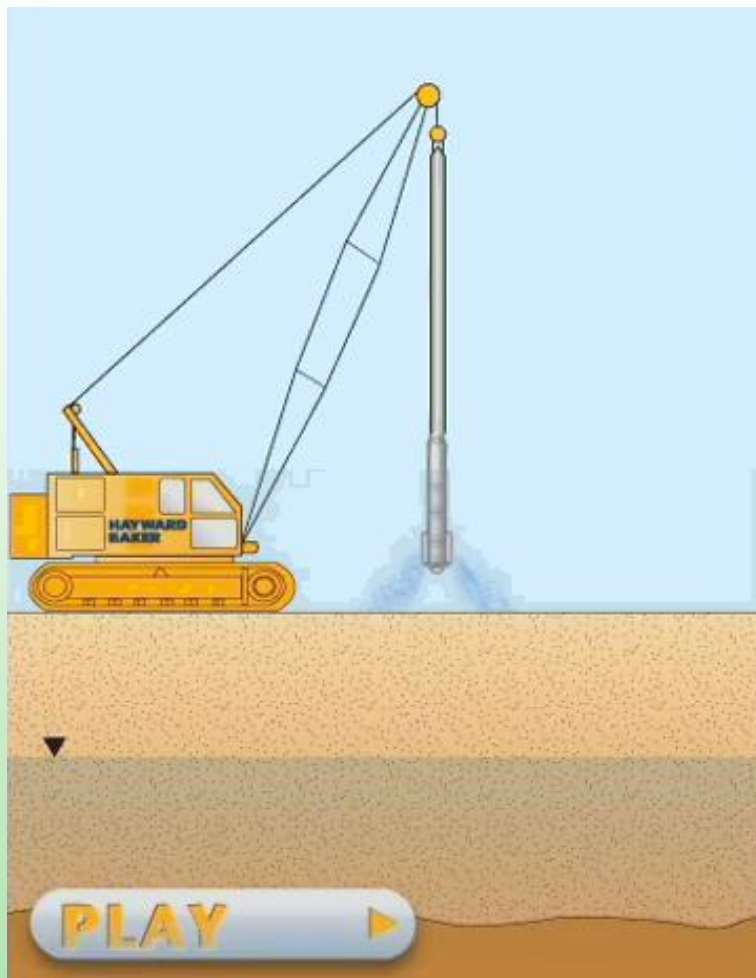
Ispitivanja pokazuju da iznos dilatacije ovisi o stanju naprezanja (Rowe 1962) pa tako za stanje naprezanja na početku pokusa, $\eta < M_{cv}$, dilatacija poprima pozitivnu vrijednost i za rahle i za zbijene uzorke pijeska, odnosno uslijed smicanja dolazi do zbijanja. Međutim za zbijene pijeske karakteristično je da dilatacija mijenja predznak za $\eta \approx M_{cv}$ što pri daljnjem smicanju uzrokuje razrahljenje uzorka (dijagram e_v - e_q).

Za pijesak je karakteristično da se sa porastom posmične deformacije smanjuje njegova krutost, odnosno dolazi do redukcije krutosti. Krutost se uobičajeno opisuje ili sekantnim G_s ili tangentnim G_t modulom posmične krutosti, koji u ishodištu poprimaju jedinstvenu vrijednost, koja se naziva početni modul posmične krutosti $G_0 = G_t = G_s$ (dijagram q - e_q). U kritičnom stanju tangentni modul krutosti poprima vrijednost $G_t = 0$, dok se sekantni modul neprekidno smanjuje .

PONAŠANJE PIJESKA – rahljenje zbijenog pijeska

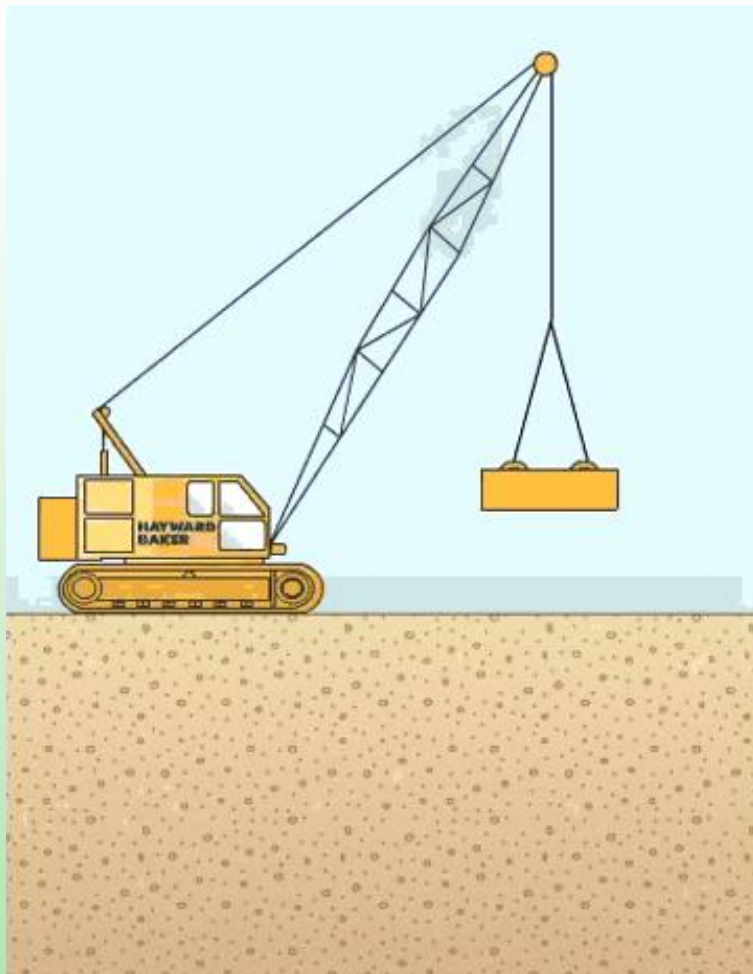


PONAŠANJE PIJESKA – zbijanje rahlog pijeska



Poboljšanje tla vibriranjem. Sonda koja vibrira utiskuje se u tlo pri čemu se nanose posmična naprezanja uslijed čega se rahli pijesak zbija.

PONAŠANJE PIJESKA – zbijanje rahlog pijeska



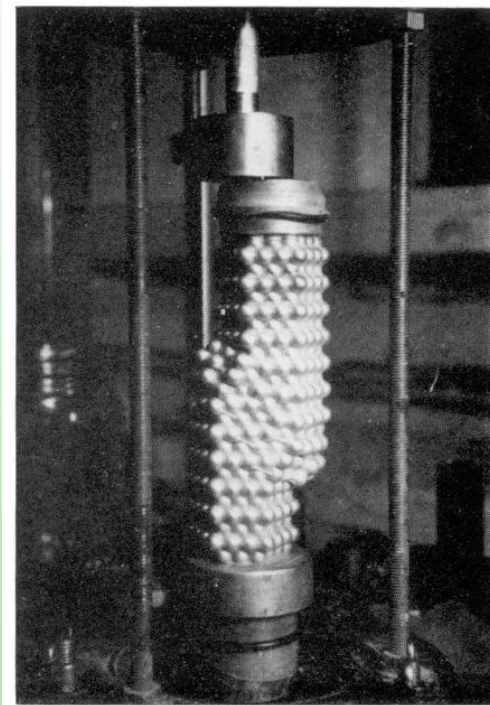
Poboljšanje tla dinamičkim zbijanjem. Uteg velike težine baca se na površinu terena pri čemu se nanosi dinamičko opterećenje te dolazi do zbijanja rahlog pijeska.

DILATACIJA

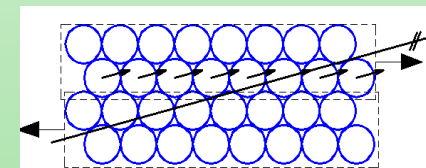
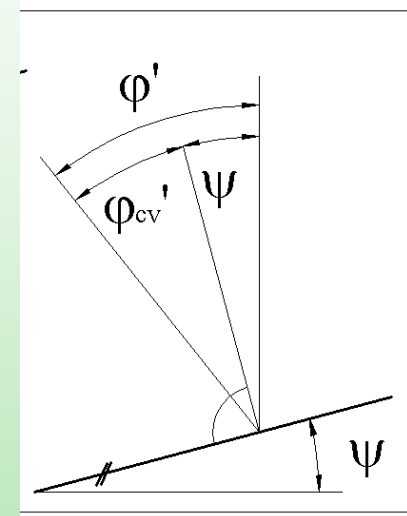
Dilatacija je svojstvo **promjene volumena prilikom smicanja** pijeska u uvjetima konstantnog izotropnog naprezanja.



primjer djelovanja dilatacije



ispitivanje dilatacije



ZBIJENI UZORAK

DILATACIJA

Reynolds (1885); Cassagrande (1936)

Rowe (1962)

$$D^p = \frac{d\varepsilon_v^p}{d\varepsilon_q^p} = \frac{9(M_p - \eta)}{9 + 3M_p - 2M_p\eta}$$

Roscoe & Scofield (1963)

Schofield & Wroth (1968)

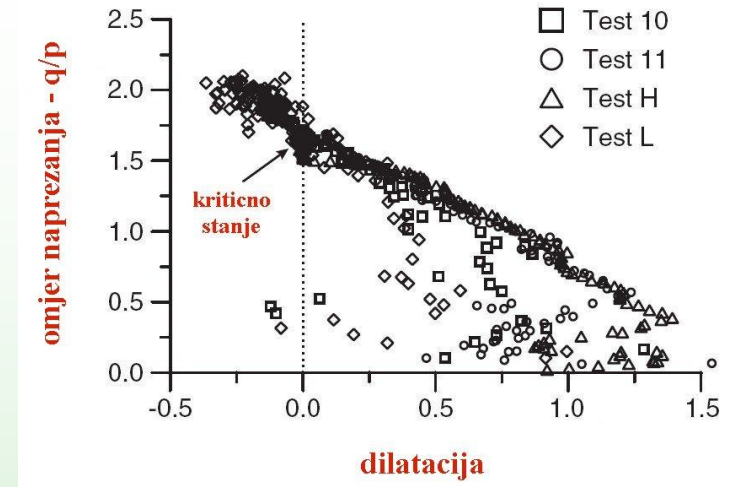
$$D^p = M_p - \eta$$

Nova (1982); Been & Jefferies (2006)

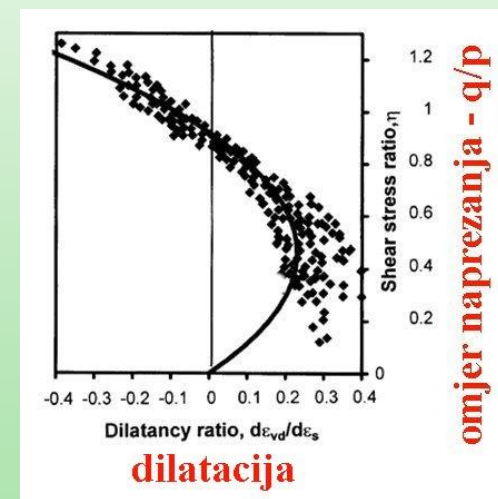
$$D^p = k_D M_p - \eta$$

Gutierrez (2003)

$$D^p = \frac{d\varepsilon_v^p}{d\varepsilon_q^p} = \frac{\eta}{M_p} (M_p - \eta)$$



Dog's Bay pijesak (Coop, 1990)



Ottawa pijesak (Gutierrez, 2003)

DILATACIJA

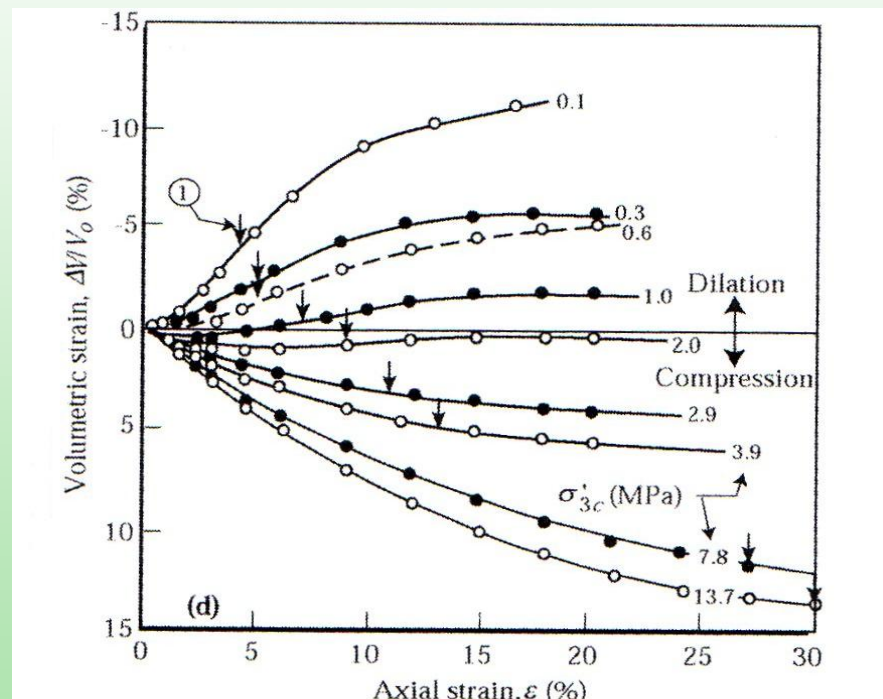
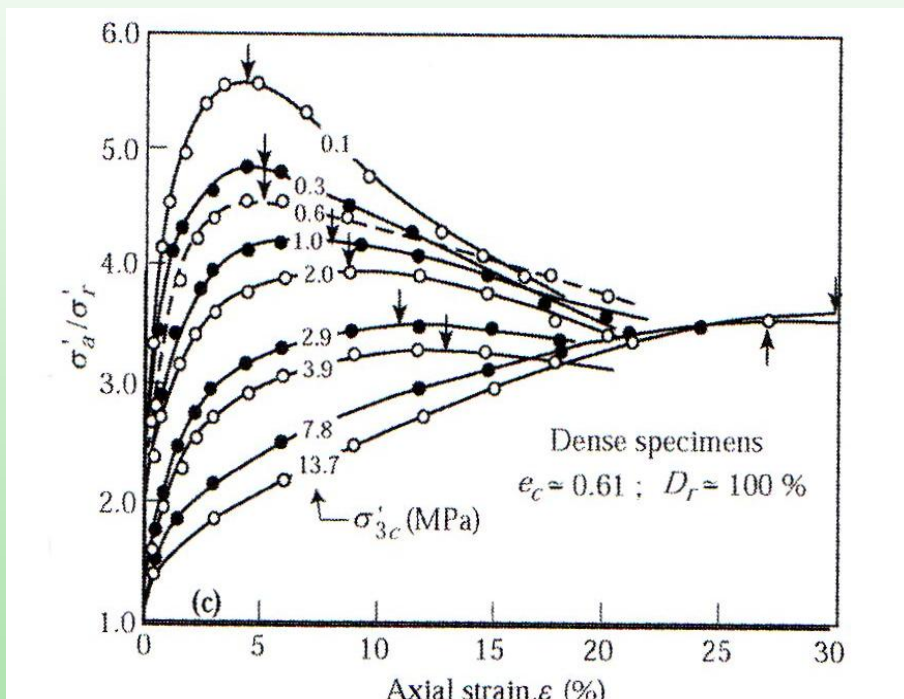
Dilatacija, definirana kao promjena volumena zrnatog tla pri smicanju u dreniranim uvjetima i približno stalnom srednjem efektivnom naprezanju, jedan je od temelja mehanike kritičnih stanja. Samu je pojavu dilatacije opisao već Reynolds (Reynolds, 1885). Mnogi istraživači su kasnije istraživali pojavu, pa tako Taylor (Taylor, 1948), uočivši da je trenje među česticama pijeska znatno manje nego kut trenja mase pijeska, uvodi, korekcijom potrošene energije, vezu između globalnog kuta trenja pijeska, kuta trenja među česticama i dilatacije. Tu ideju je dalje razradio Rowe (Rowe, 1962) pokazavši da intenzitet dilatacije ovisi o kvocijentu najvećeg i najmanjeg glavnog efektivnog naprezanja. Rowe je u svojoj analizi krenuo od pretpostavke da će u zrnatom tlu odnos uložene i utrošene energije biti minimalan. De Joselin de Jong (De Joselin de Jong, 1976) je, međutim, pokazao da izraz za dilataciju, do kojeg je došao Rowe, mora vrijediti samo zbog pojave trenja i ravnoteže čestica i da pretpostavka o minimumu energije nije potrebna. Collins i dr. (2007) dilataciju su okarakterizirali kao interno ograničenje u deformiranju zrnatih materijala te ukazali na potrebu identifikacije dvaju mehanizama koji utječu na njegovo mehaničko ponašanje: dilataciju kao posebnost zrnatih materijala, i deformaciju neprekidne sredine jedinstvenu za sve materijale.

DILATACIJA

Već je Rowe bio svjestan da eksperimenti malo odstupaju od njegove teorije ako se za trenje među česticama stavi nezavisno mjereni stvarni kut trenja. Zbog toga on predlaže da se za kut trenja među česticama stavi neki ekvivalentni kut trenja po veličini između stvarnog i onog globalnog za kritično stanje. Prema Roweu za zbijene pijeske taj je ekvivalentni kut bliži stvarnom kutu trenja među česticama, dok je za rahle on bliži kritičnom kutu trenja. Pri tome stvarni kut trenja među česticama ovisi o veličini sile na kontaktima, a time o veličini zrna. Za kvarcna zrna veličine prašine on iznosi oko 30° , za sitan pijesak oko 28° , za srednji oko 25° , a za krupni oko 22° (Rowe, 1962). S druge strane, neka druga istraživanja ne podržavaju ove nalaze (Ventouras, 2005). Kasnije su istraživači pokušali na razne načine opisati ovisnost dilatacije o kvocijentu naprezanja i zbijenosti pijeska. Pri provjeri tih zakonitosti poteškoću čini činjenica da je dilatacija izražena kao derivacija volumenske deformacije po devijatorskoj deformaciji kao varijabli. Obzirom da po prirodi mjerni instrumenti daju diskretne podatke volumenskih i devijatorskih deformacija koje su po sebi već opterećeni neizbježnim mjernim pogreškama, određivanje derivacije je vrlo nepouzđano i otežava interpretaciju osobito pri manjem omjeru naprezanja. Sve u svemu, konačni analitički oblik ovisnosti dilatacije o kvocijentu naprezanja i zbijenosti pijeska još nije dobio konsenzus istraživača.

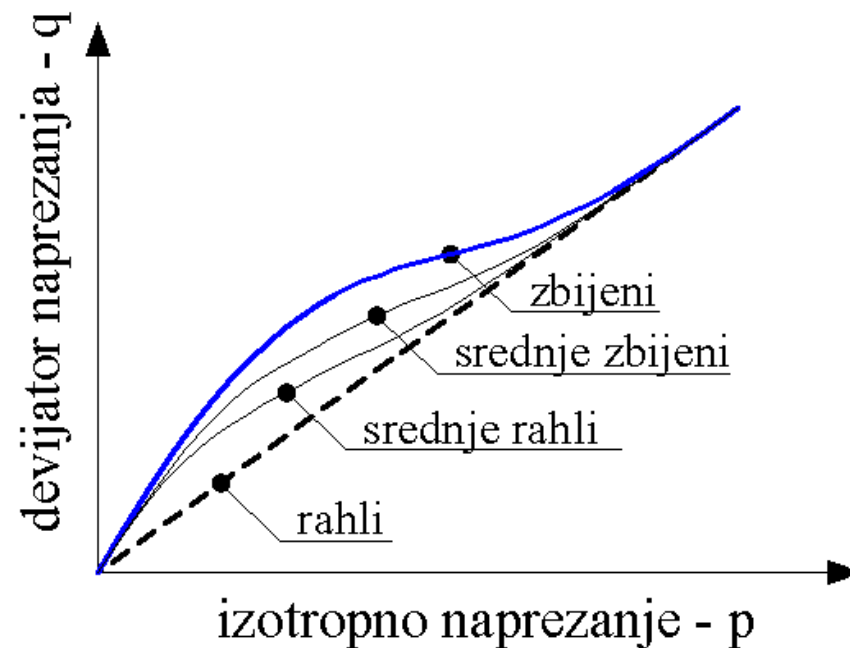
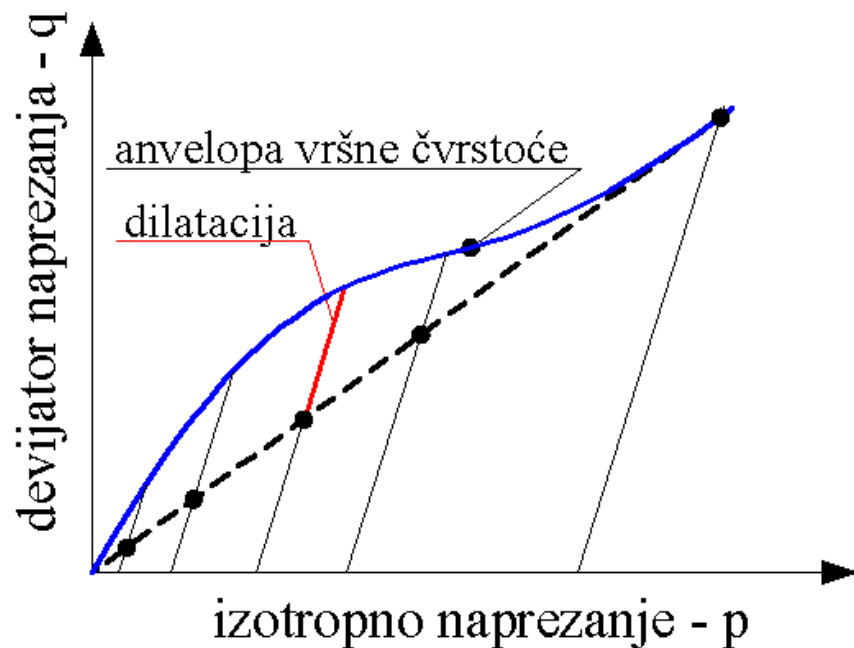
VRŠNA ČVRSTOĆA

Vršna čvrstoća je **maksimalna čvrstoća** koju pijesak postiže uslijed smicanja pri određenoj zbijenosti i određenom izotropnom naprezanju. Javlja se kod **zbijenih materijala**, međutim isčezava s povećanjem izotropnog naprezanja.



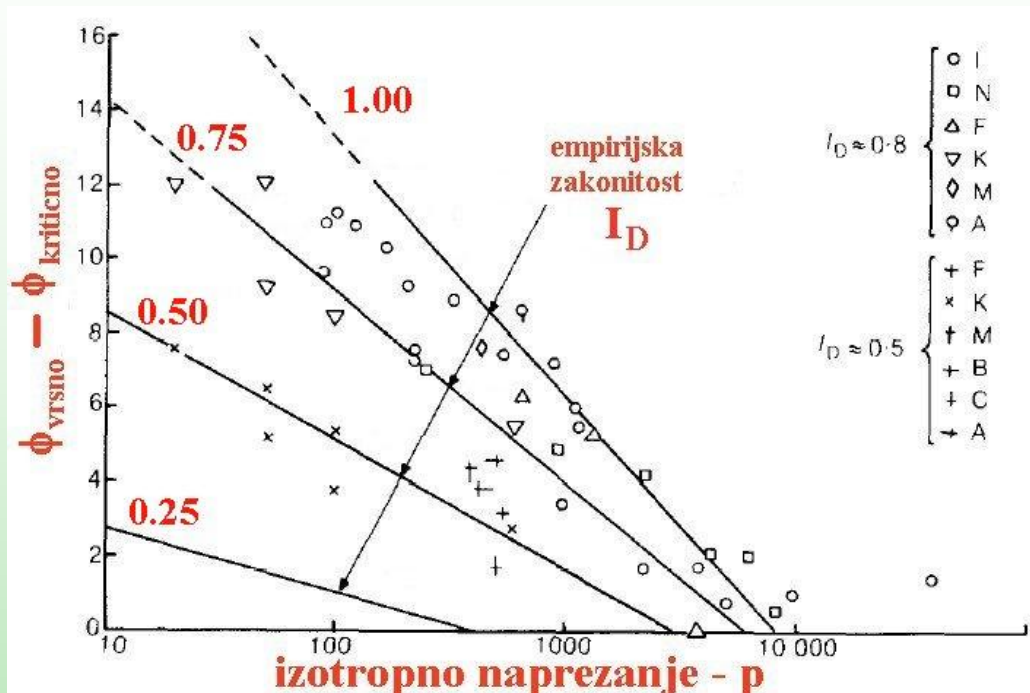
Sacramento River pijesak, Lee (1965)

VRŠNA ČVRSTOĆA



Vršna čvrstoća i njena ovisnost o dilataciji, srednjem efektivnom naprezanju te stanju zbijenosti materijala

VRŠNA ČVRSTOĆA



Dijagram razlike vršne čvrstoće i čvrstoće za kritično stanje ovisno o zbijenosti i razini izotropnog naprezanja, Bolton (1986)

Analiza ispitivanja 17 različitih pijesaka.

Razlika vršne čvrstoće i čvrstoće za kritično stanje:

$$\phi'_p - \phi_c = 3I_R$$

Dilatacijski indeks:

$$I_R = I_D \left[Q - \ln \left(\frac{100 p'}{p_A} \right) \right] - R$$

$$I_D = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}}$$

ČVRSTOĆA

Kada se govori o čvrstoći pijeska treba imati na umu da ona ovisi o uvjetima naprezanjima i deformacijama u kojem se nalazi pijesak. Ovisno o veličini deformacije razlikujemo čvrstoću za kritično stanje M_{cv} (koja se javlja pri velikim posmičnim deformacijama $e_q \approx 25\%$) te vršnu čvrstoću M_p koja se za zbijenije pijeske javlja pri znatno manjim posmičnim deformacijama $e_q \approx 3\%$). Pri tome je riječ o čvrstoći koju pijesak postiže u tro-osnom pokusu koja ujedno ovisi i o smjeru opterećenja, pa tako razlikujemo čvrstoću pijeska za tro-osnu kompresiju M_C , odnosno za tro-osnu ekstenziju M_E . Dodatno, pijesak se u prirodi nalazi u općem stanju trodimenzionalnog naprezanja (tro-osno naprezanje je samo jednostavan slučaj trodimenzionalnog naprezanja) a čvrstoća koju postiže za različito 3D stanje naprezanja opisana je plohom u 3D polju naprezanja. Oblik plohe najčešće se prikazuje u π -ravnini koja je okomita na prostornu dijagonalu glavnih naprezanja, a čvrstoća pijeska $M(\theta)$ opisuje se ovisnom o Lodeovom kutu θ , koji definira smjer naprezanja u π -ravnini. Čvrstoća također ovisi i o uvjetima dreniranosti, pa tako za nedrenirano stanje pijesak u CIU pokusu postiže nedreniranu čvrstoću q_u , koja je za zbijene pijeske znatno veća od drenirane, a za vrlo rahle manja od drenirane.

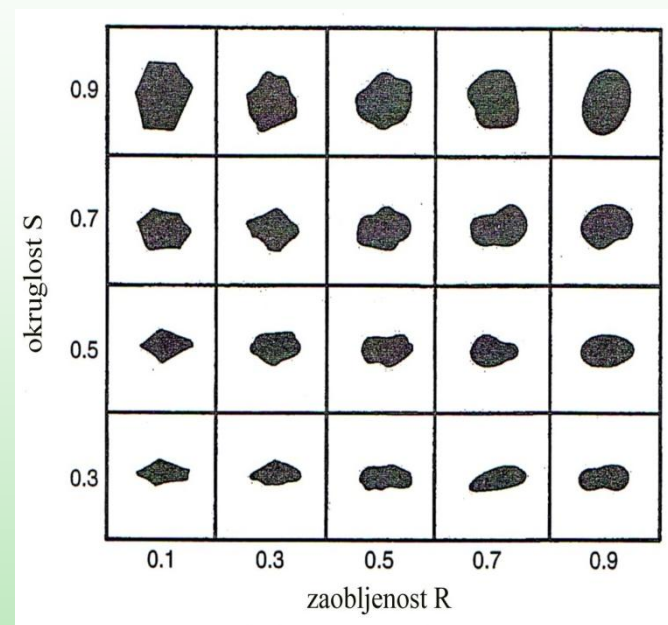
ČVRSTOĆA

Čvrstoća pijeska za kritično stanje

Ispitivanja pokazuju da se čvrstoća pijeska za kritično stanje može vrlo dobro opisati Mohr-Coulombovim pravcem čvrstoće korištenjem kuta unutarnjeg trenja za kritično stanje φ_{cv} , odnosno omjera naprezanja za kritično stanje M_{cv} . Vrijednost kuta unutarnjeg trenja ovisi prvenstveno o obliku čestica pijeska, njihovoj veličini i mineraloškom sastavu te o granuloemtrijskom sastavu. Tipične vrijednosti kreću se oko 40° za dobro graduirane, uglate kvarcne pijeska, 36° za uniformne djelomično zaobljene kvarcne pijeske te 32° za uniformne okrugle kvarcne pijeske. Istraživanja koja su proveli Santamarina i Cho (2004) na velikom broju različitih tipova pijesaka, pokazuju da kut unutarnjeg trenja za kritično stanje ovisi prvenstveno o zaobljenosti zrna pijeska i može se procijeniti prema izrazu:

$$\varphi_{cv} = 42 - 17R$$

gdje je R zaobljenost zrna pijeska koja se definira kao omjer prosječnog polumjera zakrivljenosti površine zrna i polumjera najveće kugle koja se može u zrnu opisati.



Karakterizacija oblika zrna pijeska
(Santamarina & Cho 2004)

ČVRSTOĆA

Vršna čvrstoća pijeska u tro-osnom pokusu smicanja

Vršna čvrstoća pijeska u tro-osnom pokusu smicanje često se izražava u normaliziranom obliku kao vršna vrijednost odnosa devijatora naprezanja q i srednjeg efektivnog naprezanja p' koju pijesak doživljava u pokusima tro-osnog monotonog smicanja. Ako se sa q_p označi vršna vrijednost devijatora naprezanja, tada normalizirana vršna čvrstoća iznosi:

$$M_p = \frac{q_p}{p'}$$

Parametar M_p povezan je sa vršnim efektivnim kutom trenja φ'_p preko poznatog izraza:

$$M_p = \frac{6 \sin \varphi'_p}{3 - \sin \varphi'_p}$$

Vršna čvrstoća kod zbijenog pijeska veća je od čvrstoće za kritično stanje, a rezultat je različitih utjecaja koji se javljaju prilikom smicanja znatog materijala pijeska među koje spadaju kontaktno trenje među česticama pijeska, preraspodjela čestica, drobljenje zrna te dilatacija. S obzirom da se trenje među česticama i kut unutarnjeg trenja za kritično stanje mogu smatrati konstantnim za dani pijesak, glavni utjecaj na pojavu vršne čvrstoće ima dilatacija pijeska. Ispitivanja pokazuju da taj doprinos ovisi o zbijenosti pijeska te o srednjem efektivnom naprezanju.

ČVRSTOĆA

U pravilu vršna čvrstoća se povećava sa povećanjem zbijenosti, a smanjuje sa povećanjem srednjeg efektivnog naprezanja. Vršna čvrstoće često se izražava slijedećim izrazima:

$$\varphi_p = \varphi_{cv} + \Delta\varphi$$

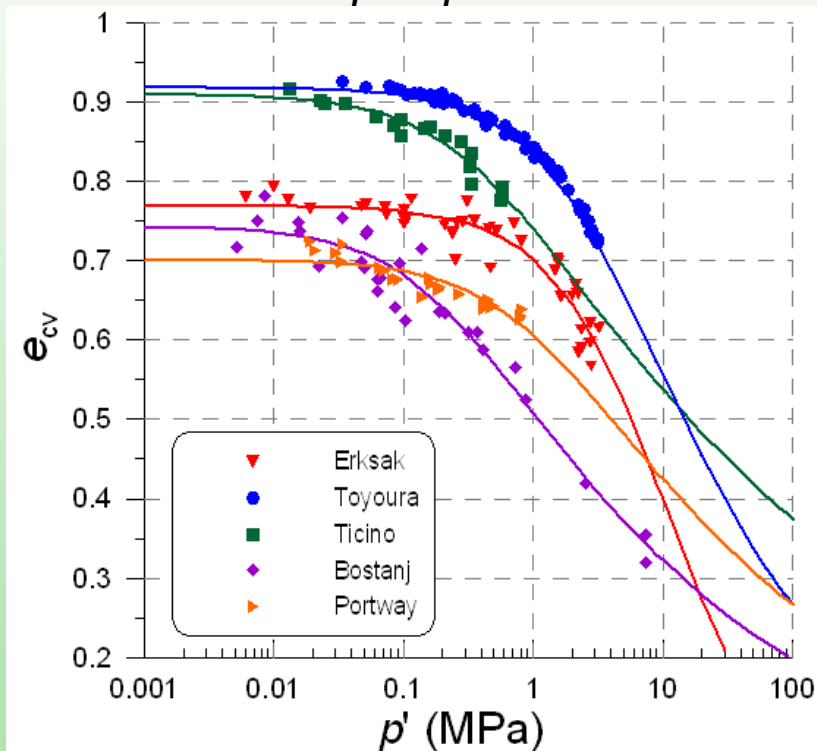
$$M_p = M_{cv} + \Delta M$$

Najopsežnije istraživanja utjecaja koeficijenta pora i srednjeg efektivnog naprezanja na efektivni sekantni kut trenja objavio je Bolton (Bolton, 1986; Bolton, 1987). Najnovija istraživanja vršne čvrstoće pijeska proveli su u duhu teorije kritičnog stanja Jefferies & Been (2006) te su pokazali da se vršna čvrstoća može definirati kao linearna zavisnost o parametru stanja pijeska.

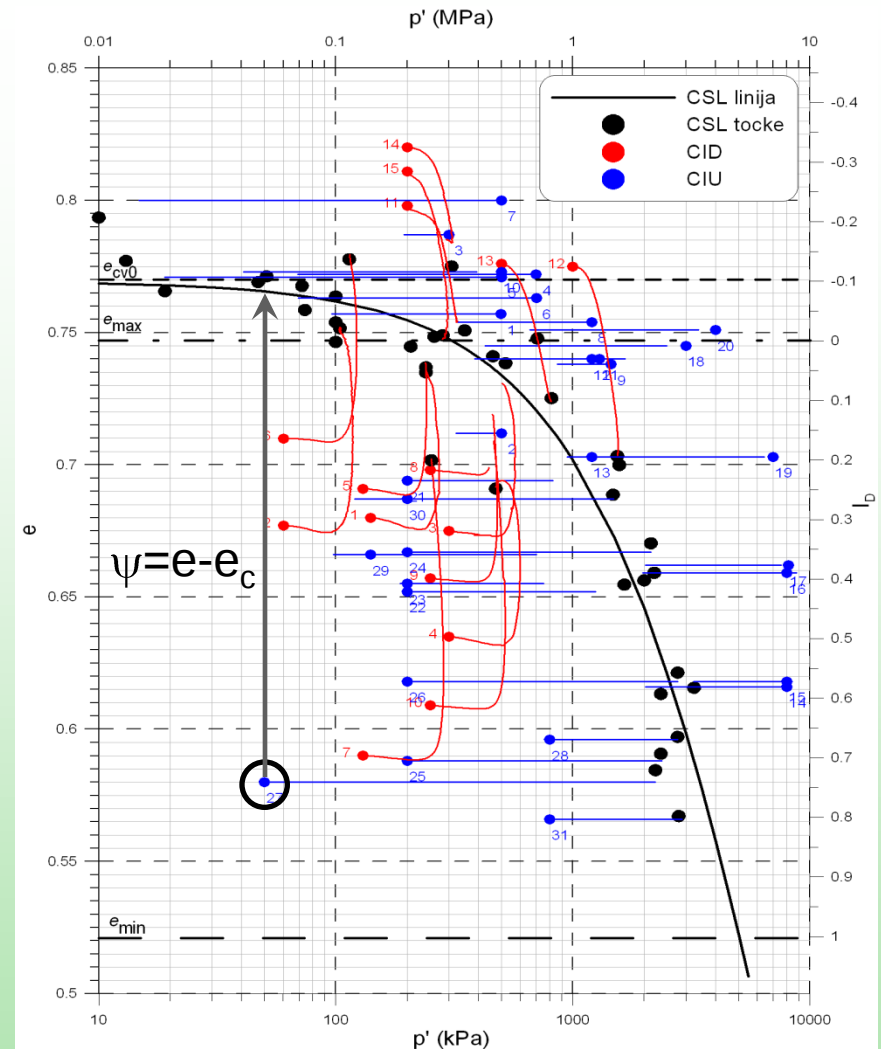
KRITIČNO STANJE

Kritično stanje je stanje u kojem se pijesak kontinuirano smiče jednakom brzinom bez promjene naprezanja i bez promjene volumena.

$$\delta V = \delta q = \delta p = \delta e = 0$$



Kritično stanje za razne pijeske



Kritično stanje za Erksak pijesak;
CID i CIU pokusi $e - p'$ dijagramu;
parametar stanja - ψ

KRITIČNO STANJE - likvefakcija



Niigata potres 1964

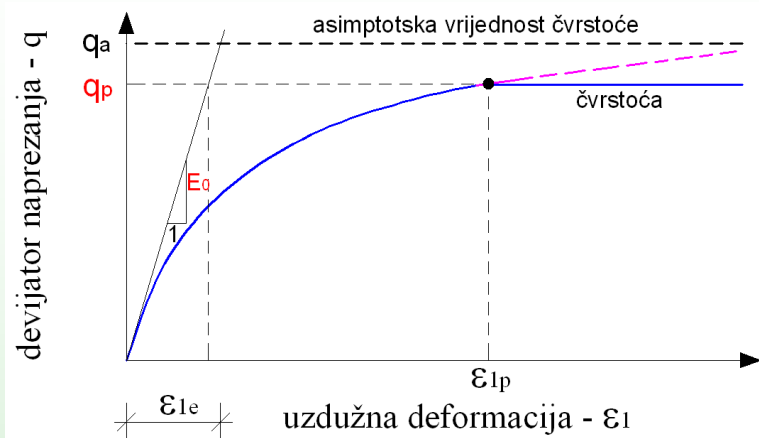
Potres koji se dogodio u Niigati 1964 god. ošteti je veliko područje na zapadnoj obali Japana. Epicentar potresa bio je udaljen oko 35 km od središta grada, a snaga potresa 7.3 prema Richterovoj skali.

Grad Niigata leži na ušću rijeke Shinano. Geotehnički profil tla ispod grada sadrži naslage finog aluvijalnog pijeska debljine oko 30 m. Oštećenja na objektima rezultat su pojave likvefakcije u plćim zonama tla. Zbog sloma temeljnog tla u zoni likvefakcije došlo je do rušenja objekata, koji su se nagnuli i do 80 stupnjeva. Podzemni objekti (septičke jame, rezervari, kanalizacija isl.) isplivali su tokom potresa na površinu terena.

KRITIČNO STANJE

Kritično stanje zrnatih materijala obično se definira kao stanje zbijenosti, uglavnom izraženo koeficijentom pora, i stanje efektivnih naprezanja pri kojem zrnati materijal podnosi veće smicanje bez promjene zbijenosti i bez promjene naprezanja. Koeficijent pora u kritičnom stanju naziva se kritičnim koeficijentom pora. Prvi ga je opisao Casagrande kao temeljno svojstvo pijesaka (Casagrande, 1936). Kasnije je razvijen niz modela temeljen na pojmu kritičnog koeficijenta pora, počevši s Roscoem, Schofieldom i Wrothom (Roscoe i dr. 1958), nazvani zajedničkim imenom „**mehanika tla kritičnog stanja**“ (Schofield & Wroth, 1968; Wood, 1990). Ovi su se modeli prvenstveno bavili glinama da bi kasnije, uz odgovarajuća proširenja, sve bolje opisivali i pijeske (Jefferies M. G., 1993; Jefferies & Been, 2006). Nit vodilja u tim modelima je uvjetovanost ponašanja tla njegovim stanjem, izraženog koeficijentom pora i srednjim efektivnim naprežanjem, relativno u odnosu na kritično. Kritično je stanje opisano kritičnim koeficijentom pora ovisnim o srednjem efektivnom naprežanju i konstantnim efektivnim kutom trenja . Ovisnost kritičnog koeficijenta pora o srednjem efektivnom naprežanju opisali su Roscoe, Shofield i Wroth (1958) kao logaritamsku funkciju. Taj se opis i danas u literaturi pretežno koristi. Been i Jefferies (Been & Jefferies, 1985) uvode pojam parametra stanja kao razlike trenutačnog od kritičnog koeficijenta pora za isto srednje efektivno naprežanje te pokazuju da se pijesci istog parametra stanja ponašaju slično, neovisno o samim veličinama koeficijenta pora ili srednjeg efektivnog naprežanja, te da se neka važna svojstva pijesaka, kao što je razlika vršnog i kritičnog kuta trenja, dobro koreliraju s parametrom stanja. Sve u svemu, mehanika kritičnih stanja postala je osnovna teorija suvremene mehanike tla.

KRIVULJA SMICANJA I REDUKCIJA KRUTOSTI



q_p – vršna čvrstoća ; E_0 – početna krutost

Duncan & Chang (1970) - 'odrezana' hiperbola

$$\frac{q}{q_p} = \frac{\epsilon_1 / \epsilon_{1e}}{1 + \epsilon_1 / \epsilon_{1e}}$$

$$\epsilon_{1e} = \frac{q_p}{E_0}$$

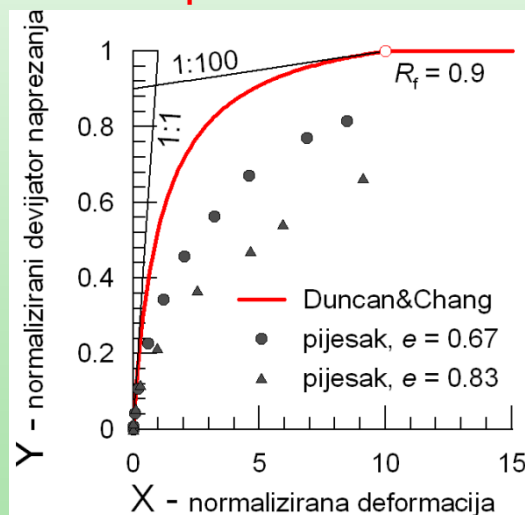
NORMALIZACIJA:

$$x = \frac{E_0 \epsilon_1}{q_0}$$

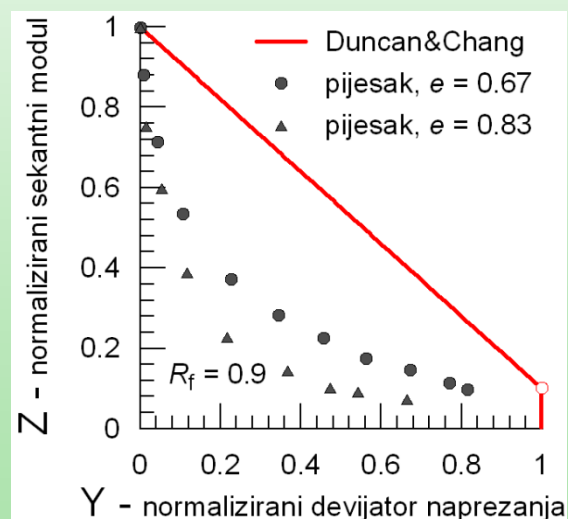
$$y = \frac{q}{q_0}$$

$$z = \frac{E}{E_0} = \frac{y}{x}$$

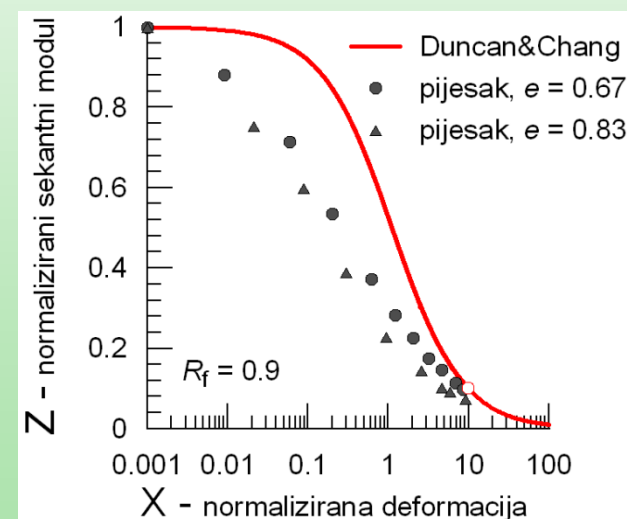
Različiti prikazi NORMALIZIRANE KRIVULJE



'velike' deformacije

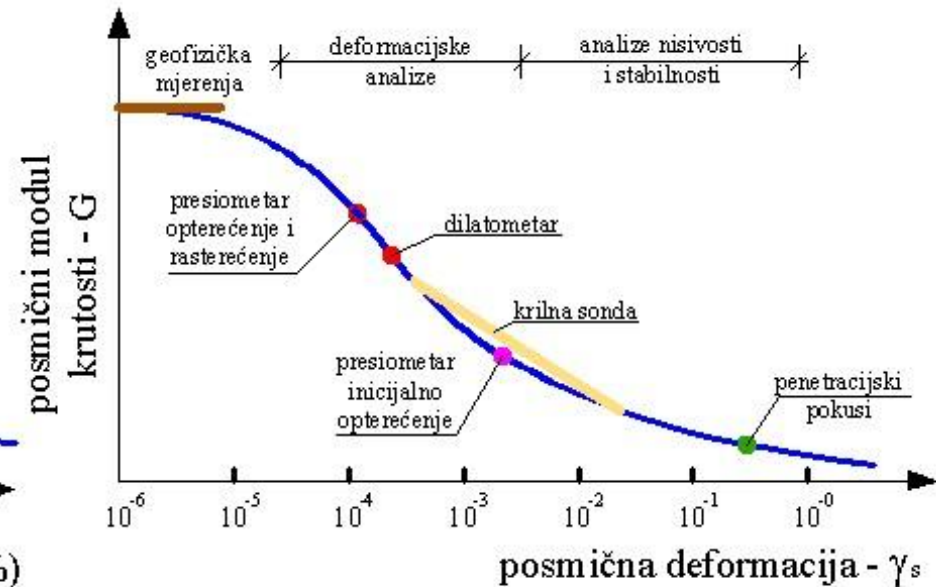
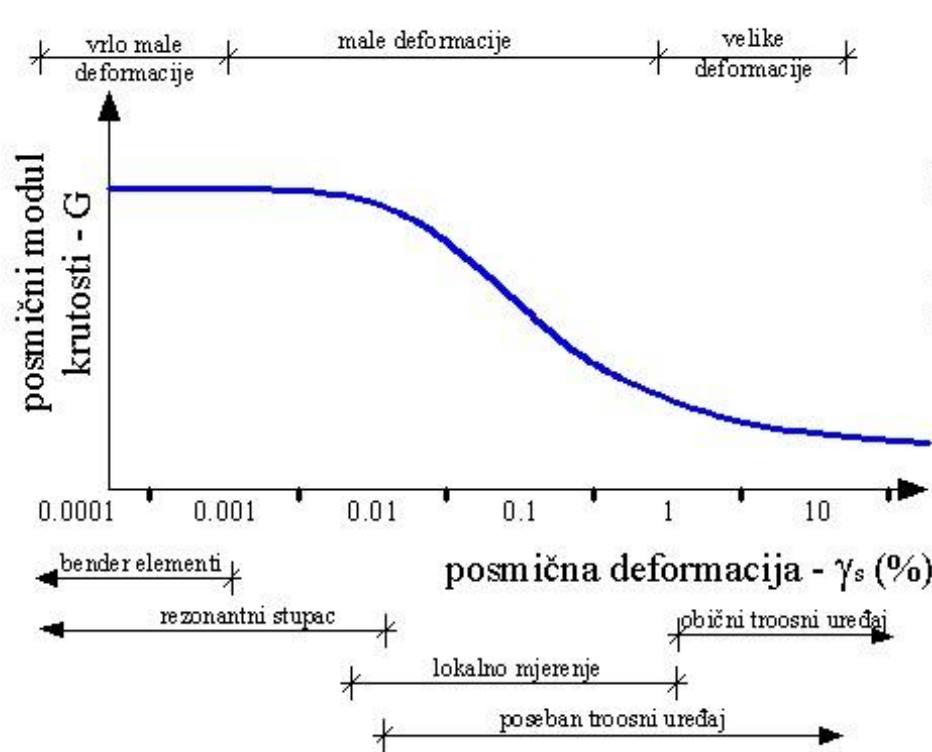


'srednje' deformacije

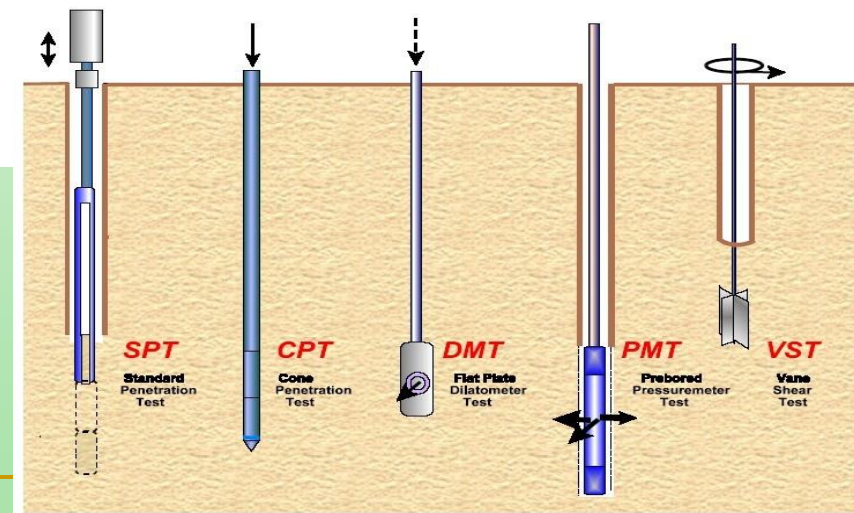


'male' deformacije

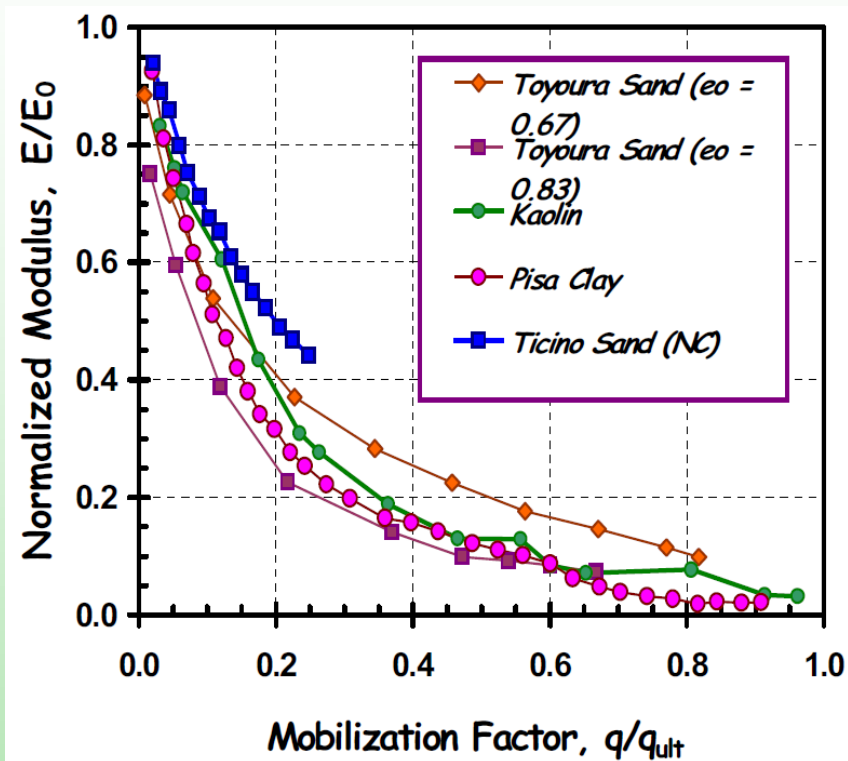
KRIVULJA SMICANJA I REDUKCIJA KRUTOSTI



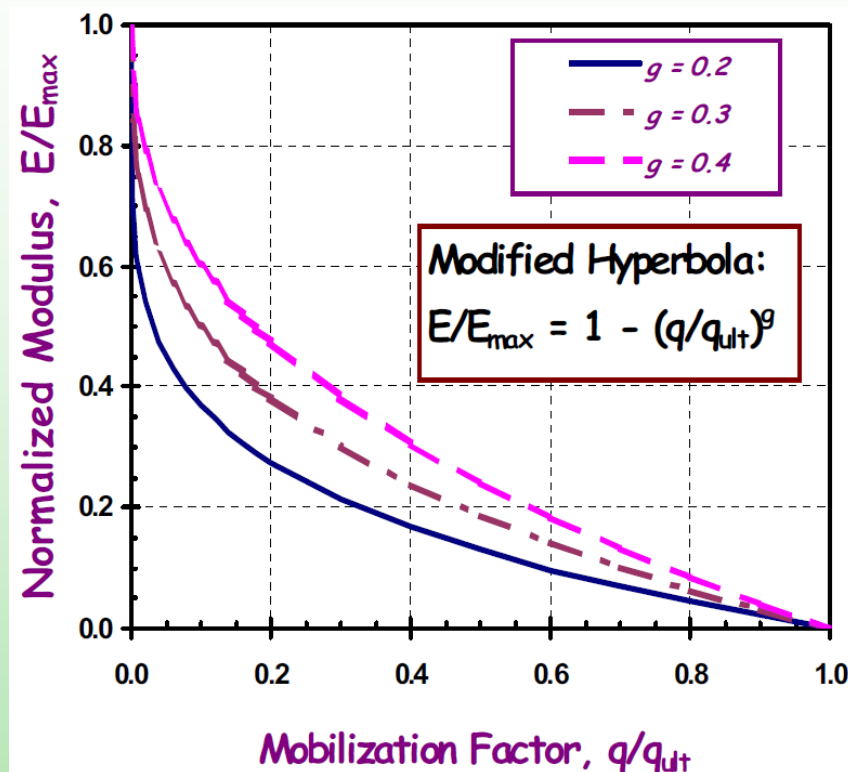
- Laboratorijska ispitivanja (Atkinson i Salfors 1991)
- Terenski istražni radovi (Mayne 2001) + pokusi



KRIVULJA SMICANJA I REDUKCIJA KRUTOSTI



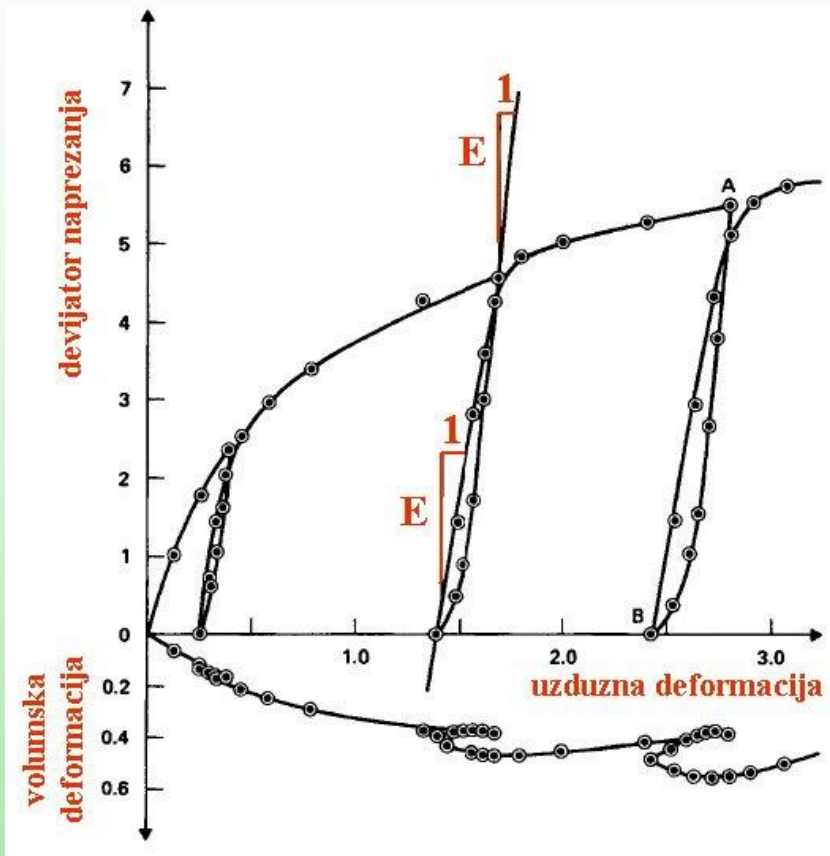
Dijagram redukcije krutosti za različite vrste tla (Mayne 2001)



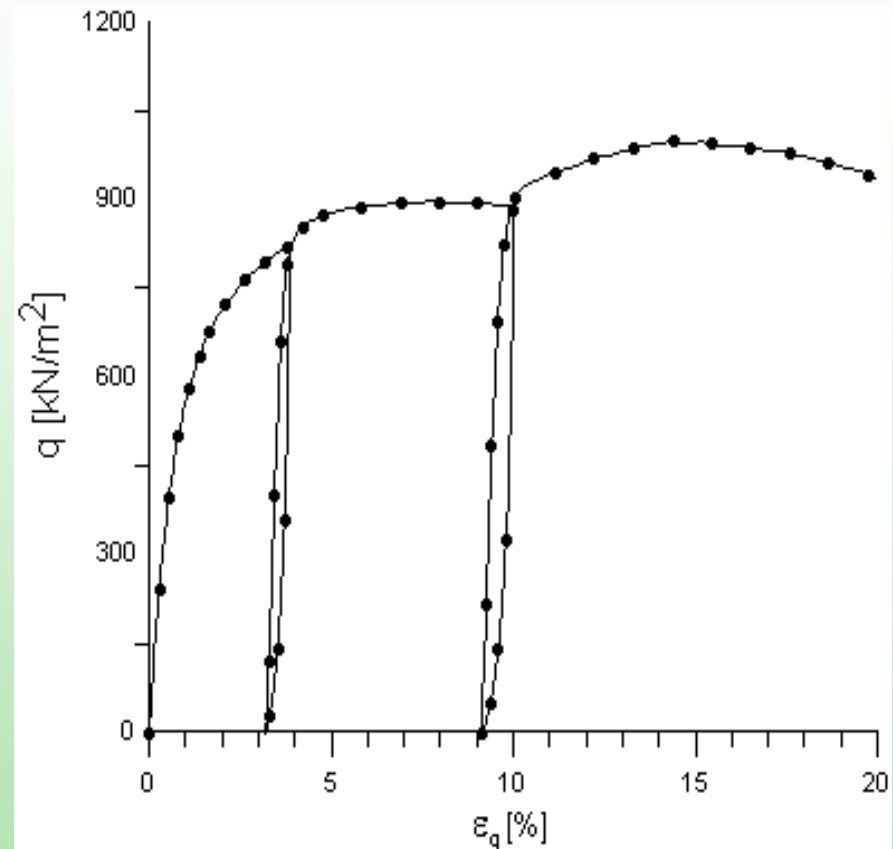
Funkcija redukcije krutosti prema Fahey & Carter za $f=1$ (Mayne 2001)

KRIVULJA SMICANJA I REDUKCIJA KRUTOSTI

OPTEREĆENJE – RASTEREĆENJE – PONOVO OPTEREĆENJE



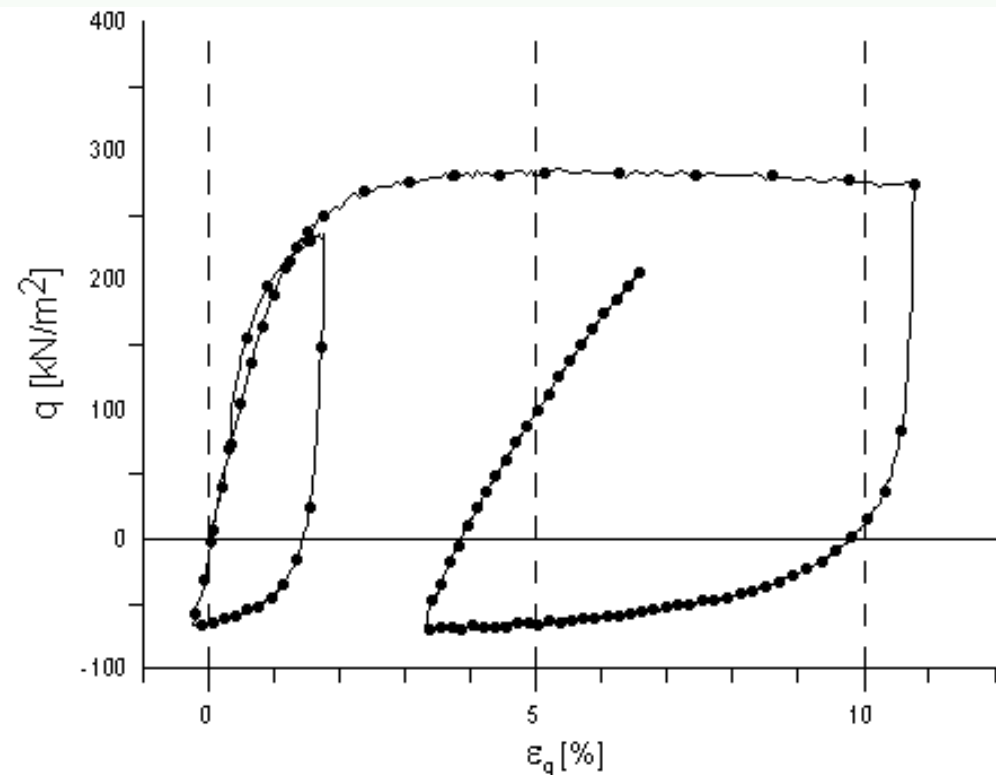
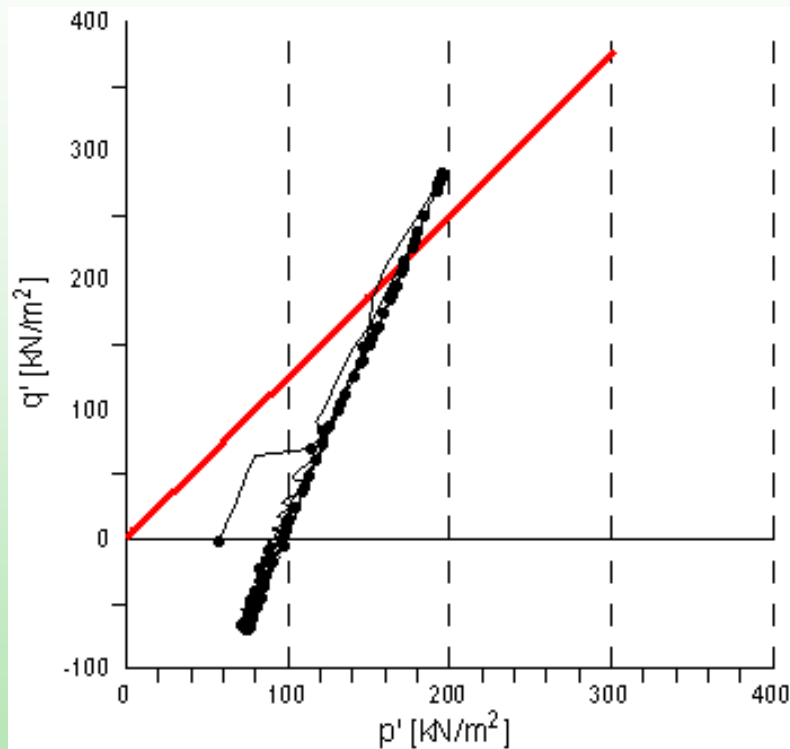
Santa Monica Beach pijesak
(Lade & Nelson, 1987)



Erksak pijesak (Ben & Jefferis 2001)

KRIVULJA SMICANJA I REDUKCIJA KRUTOSTI

OPTEREĆENJE – RASTEREĆENJE DO EKSTENZIJE – PONOVO
OPTEREĆENJE



Primjer smicanja pijeska u nekoliko faza: opterećenje do sloma u kompresiji, rasterećenje do sloma u ekstenziji, ponovno opterećenje (Erksak pijesak). U pokusu se jasno vidi **histereza** karakteristična za smicanje plastičnih materijala.

KRIVULJA SMICANJA I REDUKCIJA KRUTOSTI

Zakovitost ponašanja pijeska u monotonim dreniranim pokusima tro-osnog tlaka može se najjednostavnije opisati hiperbolnom funkcijom (Kondner, 1963):

$$\frac{q}{q_p} = \frac{\varepsilon_1 / \varepsilon_{1e}}{1 + \varepsilon_1 / \varepsilon_{1e}} \quad \frac{E}{E_0} = 1 - \left(\frac{q}{q_p} \right)$$

Duncan i Chang (Duncan & Chang, 1970) su predložili malu prilagodbu Kondnerovog izraza kako bi bolje opisali odnos devijatora naprežanja i vertikalne deformacije u dreniranim pokusima tro-osnog tlaka:

$$\frac{q}{q_p} = \frac{\varepsilon_1 / \varepsilon_{1e}}{1 + R_f \varepsilon_1 / \varepsilon_{1e}} \quad \frac{E}{E_0} = 1 - R_f \left(\frac{q}{q_p} \right)$$

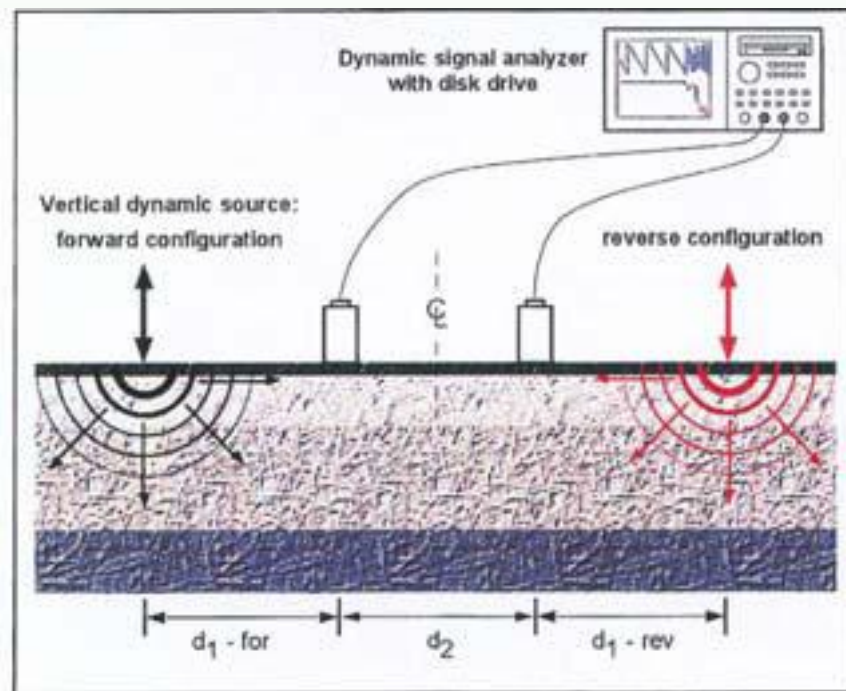
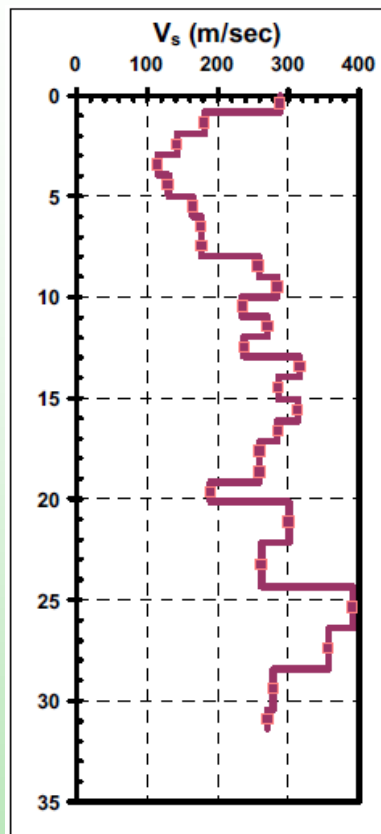
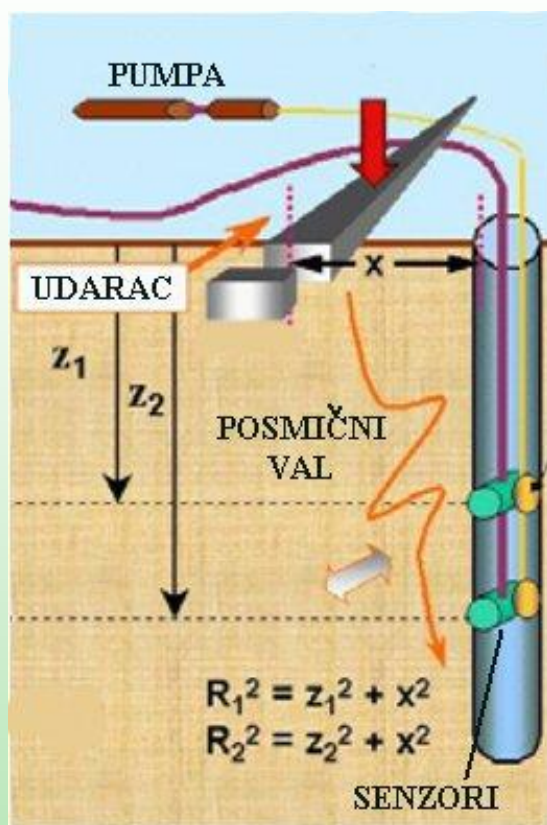
Funkcija Duncana i Changa je dugo bila vrlo popularna u praktičnim primjenama, pogotovo u programima konačnih elemenata za simulaciju geotehničkih zahvata. Pri tome je početni (tangentni) modul određivan na način najbolje prilagodbe eksperimentalno utvrđenom odnosu devijator naprežanja i vertikalne deformacije u tro-osnom tlaku. Već se tada uočavalo da je tako utvrđeni modul manji od stvarno mjenog u standardnim pokusima u kojima je deformacija uzorka u tro-osnom uređaju mjerena izvan tro-osne ćelije. Uvođenjem tehnologija mjerenja vertikalnih deformacija posebnim instrumentima neposredno pričvršćenih na uzorku tla u tro-osnoj ćeliji (Jardine i dr. 1984; Clayton & Khartush, 1986; Goto i dr. 1991) pokazalo se da mjerenja deformacija izvan tro-osne ćelije bitno podbacuju krutost tla mjerenu instrumentima neposredno na uzorku u ćeliji.

KRIVULJA SMICANJA I REDUKCIJA KRUTOSTI

Saznanje o stvarnoj krutosti tla pri vrlo malim i malim deformacijama izazvalo je pravu malu revoluciju u pogledima na krutost tla, pogotovo na odnos krutosti mjerene u laboratoriju i one interpretirane iz opažanja deformacija tla pri geotehničkim zahvatima na terenu (Burland, 1989), izazvavši brojna eksperimentalna istraživanja koja ni danas nisu izgubila na intenzitetu. Očito je da funkcija Duncana i Changa ne može opisati ta nova saznanja. Iz tog su razloga istraživači pokušali pronaći pogodnije funkcije koje bi bolje opisale ovisnost krutosti o deformaciji ili mobiliziranoj čvrstoći. Među njima se ističu (Puzrin & Burland, 1996) te (Fahey & Carter, 1993). Funkcija Puzrina i Burlanda samo je jednostavnija od nekoliko koje su predložili ti autori. Druge njihove funkcije sastoje se iz nekoliko povezanih segmenata te traže veći broj materijalnih konstanti da bi se dobro prilagodile mjerenim rezultatima. Analize Lo Prestia i dr. (Lo Presti i dr. 1998) pokazala su da višestruke funkcije Puzrina i Burlanda najbolje opisuju eksperimentalne podatke, dok je funkcija Faheya i Cartera u tom pogledu znatno lošija. Njena je prednost manji broj parametara (2 parametra) u odnosu na složenije funkcije:

$$\frac{E}{E_0} = 1 - f \left(\frac{q}{q_p} \right)^g$$

KRUTOST TLA PRI MALIM DEFORMACIJAMA



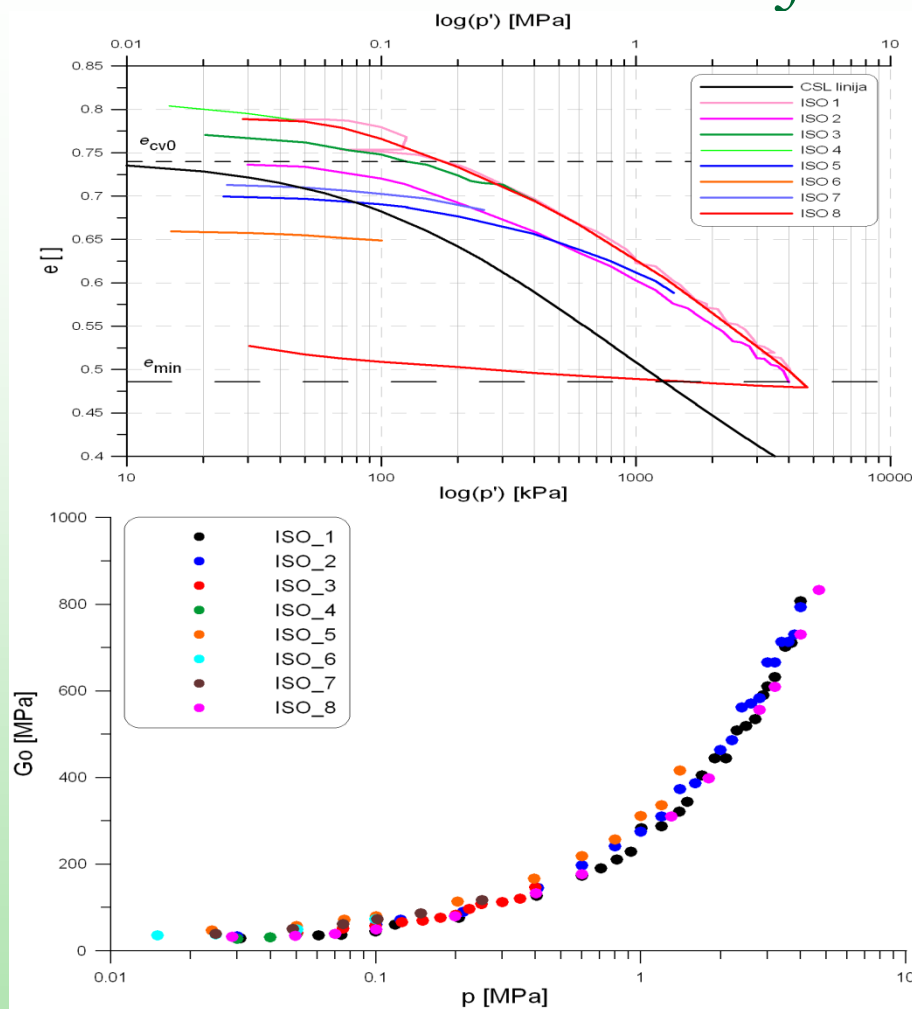
Terensko ispitivanje brzine posmičnih valova v_s : a) down-hole mjerenje; b) profil brzine posmičnih valova; c) SASW mjerenje

$$G_0 = \rho v_s^2 \quad ; \quad E_0 = 2G_0(1+\nu)$$

KRUTOST TLA PRI MALIM DEFORMACIJAMA



Laboratorijsko
ispitivanje G_0 (E_0)
- mjeraci pomaka
- bender elementi



Izotropna kompresija i mjerenje G_0 bender elementima
(Boštanj pijesak – Vilhar 2009)

KRUTOST TLA PRI MALIM DEFORMACIJAMA

Do sada je predložen niz empiričkih izraza koji definiraju ovisnost posmičnog modula tla pri vrlo malim deformacijama, G_0 o koeficijentu pora e i srednjem efektivnim naprežanjem p' (Mitchell & Soga, 2005). Neke od tih izraza navodi tablica. Oni se svi mogu prikazati u slijedećem obliku:

$$G_0 = Af(e) \left(\frac{p'}{p_{ref}} \right)^m$$

G_0 – modul posmika pri malim deformacijama

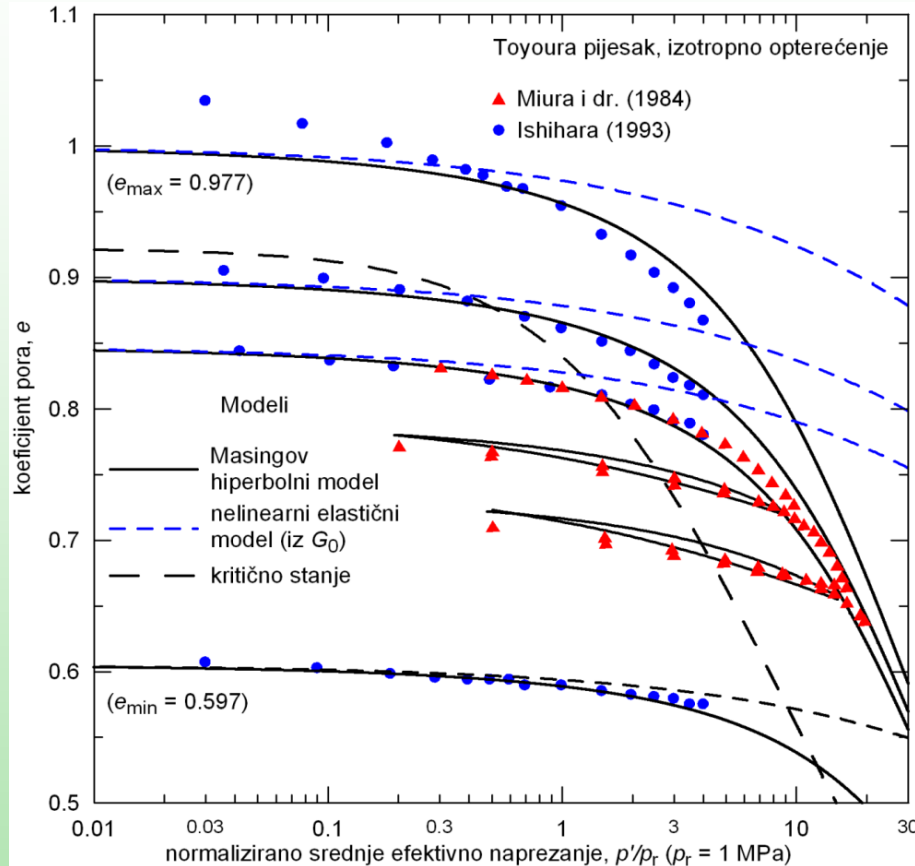
A – konstanta materijala

$f(e)$ – analitička funkcija koeficijenta pora e

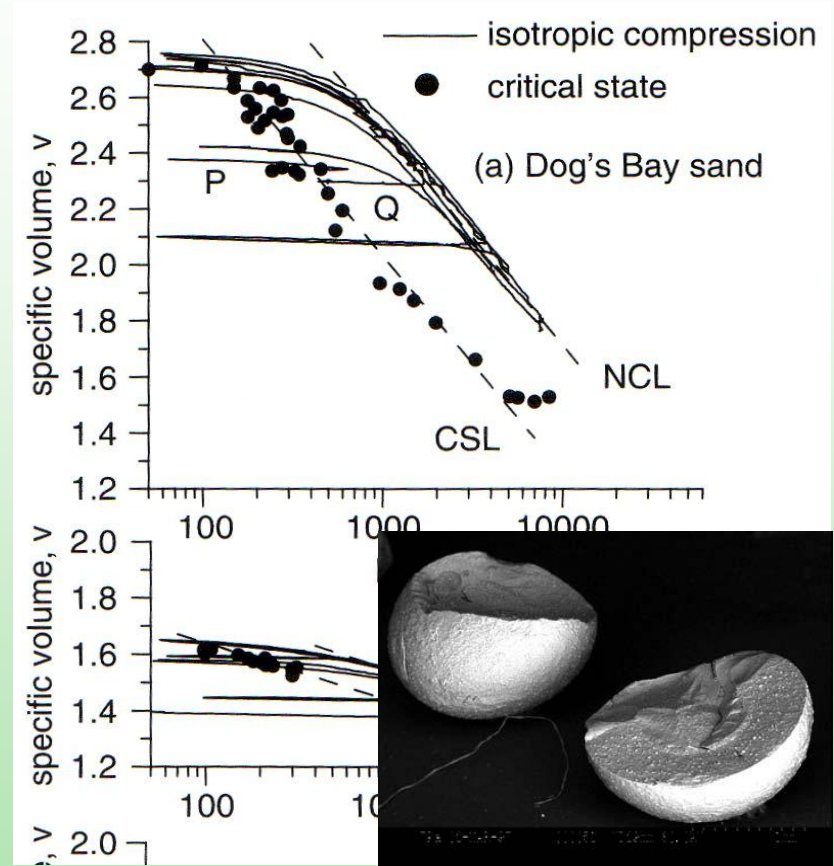
m – konstanta materijala

pijesak, autori	Cp_r	$F(e_0)$	p_r	m	raspon e_0	G_{r1}	$a_1 = \frac{1}{F(1)}$ ($e_{0r} = 1$)
	MPa	-	MPa	-	-	MPa	-
Ottawa pijeska, obla zrna (Hardin & Richart Jr., 1963)	69	$\frac{(2.17-e_0)^2}{1+e_0}$	0.1	0.5	0.3 - 0.8	47.2	1.461
kvarcni pijesak, drobljeni (Hardin & Richart Jr., 1963)	32.7	$\frac{(2.97-e_0)^2}{1+e_0}$	0.1	0.5	0.6 - 1.3	63.4	0.515
razni pijesci (Iwasaki, Tatsuoka, & Takagi, 1978)	90	$\frac{(2.17-e_0)^2}{1+e_0}$	0.1	0.4	0.6 - 0.9	61.6	1.461
Toyoura pijesak, polu uglat do polu zaobljen (Kokusho, 1980)	90	$\frac{(2.17-e_0)^2}{1+e_0}$	0.1	0.5	0.6 - 0.8	61.6	1.461
nevezani i slijepljeni pijesci i šljunci (Jamiolkowski, Leroueil, & LoPresti, 1991), (Pestana & Salvati, 2006) – prema posljednjima, temeljem velike baze podataka, najbolja funkcija F	23 - 180	$\frac{1}{(e_0)^{1.3}}$	0.1	0.5	0.2 - 1.8	23 - 180	1
Ticino pijesak (Lo Presti, Pallara, Lancellotta, Armandi, & Maniscalco, 1993)	71	$\frac{(2.27-e_0)^2}{1+e_0}$	0.1	0.43	0.6 - 0.9	57.2	1.240
pijesci i nisko plastične gline (Hicher, 1996)	60	$\frac{1}{e_0}$	0.1	0.5	0.4 - 1.6	60.0	1

IZOTROPNA KOMPRESIJA



Izotropna kompresija (Toyoura pijesak)

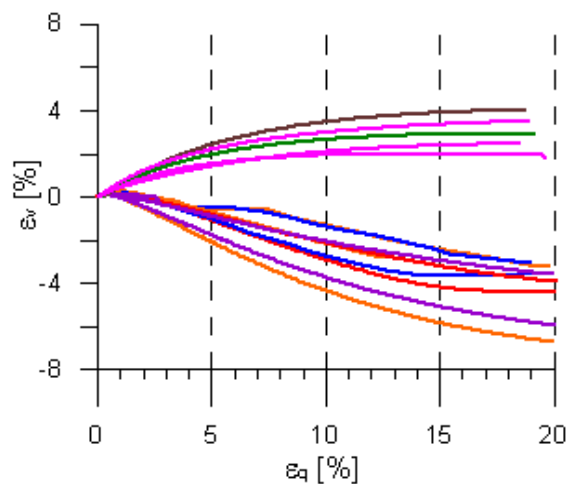
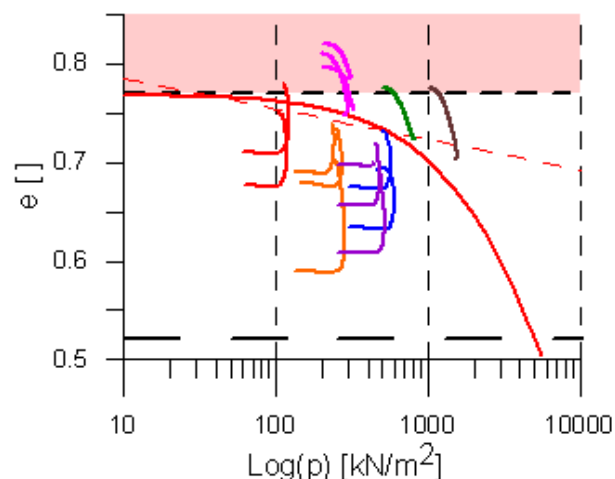
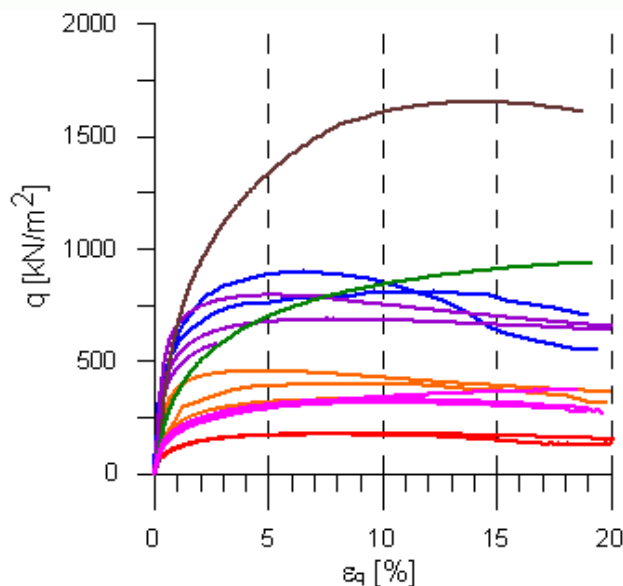
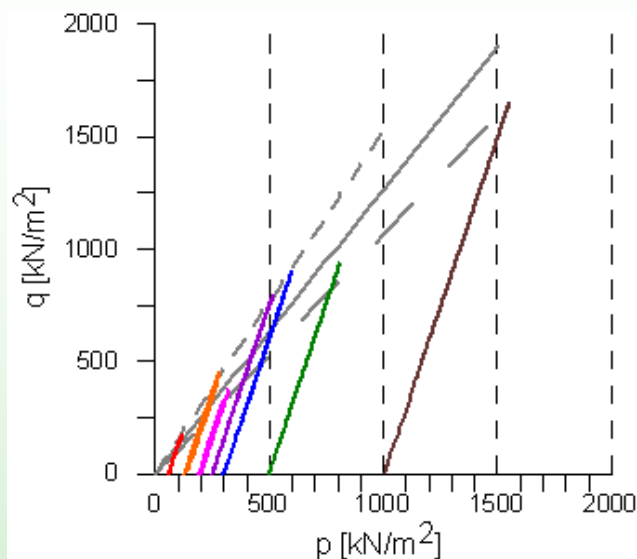


Izotropna kompresija (Dog's Bay pijesak i raspadnuti granit)

IZOTROPNA KOMPRESIJA

Prilikom izotropne kompresije pijeska potrebna je izrazito velika promjena efektivnog naprezanja p' , da bi se značajnije promijenio njegov volumen (Casagrande, 1936), za razliku od glina i prahova gdje se to postiže pri relativno malim promjenama naprezanja. Za malu promjenu izotropnog naprezanja pijesak se ponaša približno elastično, dok se plastične volumenske deformacije počinju javljati tek sa pojavom drobljenja zrna pijeska pri većim naprezanjima, kod kojih se linije izotropne konsolidacije počinju asimptotski približavati liniji normalne kompresije (Coop & Lee, 1993). Iako se skoro kod svakog tro-osnog pokusa provodi faza izotropne konsolidacije, detaljnije ispitivanje ponašanja pijeska u takvim uvjetima vrlo se rijetko spominje u literaturi. Jedan od razloga je spomenuta velika volumenska krutost pijeska pri naprezanjima koja se uglavnom javljaju kod uobičajenih geotehničkih konstrukcija. Također sa povećanjem bočnog efektivnog naprezanja javljaju se poteškoće pri interpretaciji mjerenja zbog uvlačenja membrane uzorka među čestice pijeska.

CID POKUSI – Erksak pijesak



Erksak pijesak

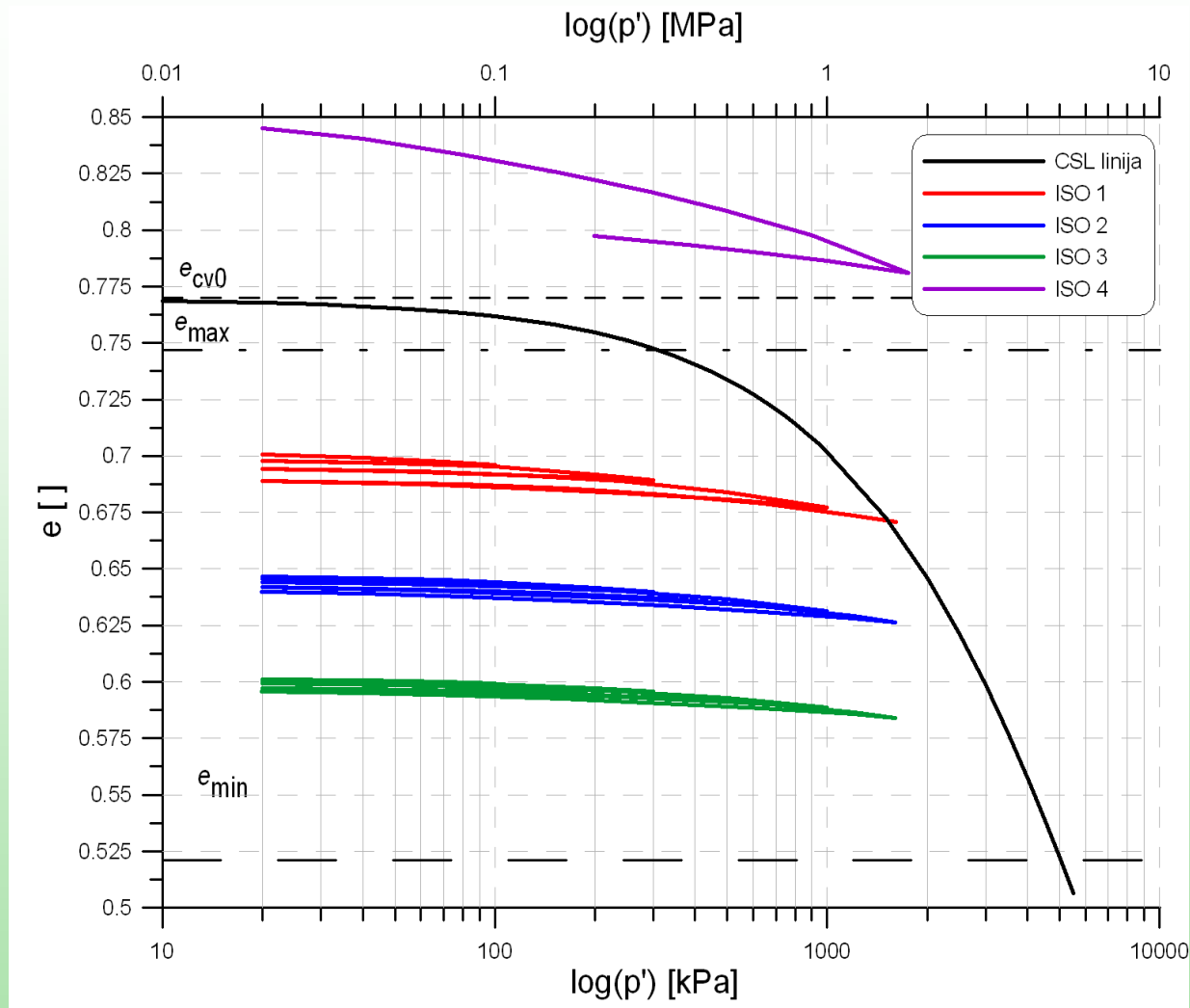
opseg ispitivanja:
- 15 CID pokusa

raspon ispitivanja:
- $p = 50$ do 8000 kPa
- $I_D = -20$ do 100 %
- $\varepsilon_1 =$ do 25 %

indeks zbijenosti:

$$I_D = \frac{e - e_{\min}}{e_{\max} - e_{\min}}$$

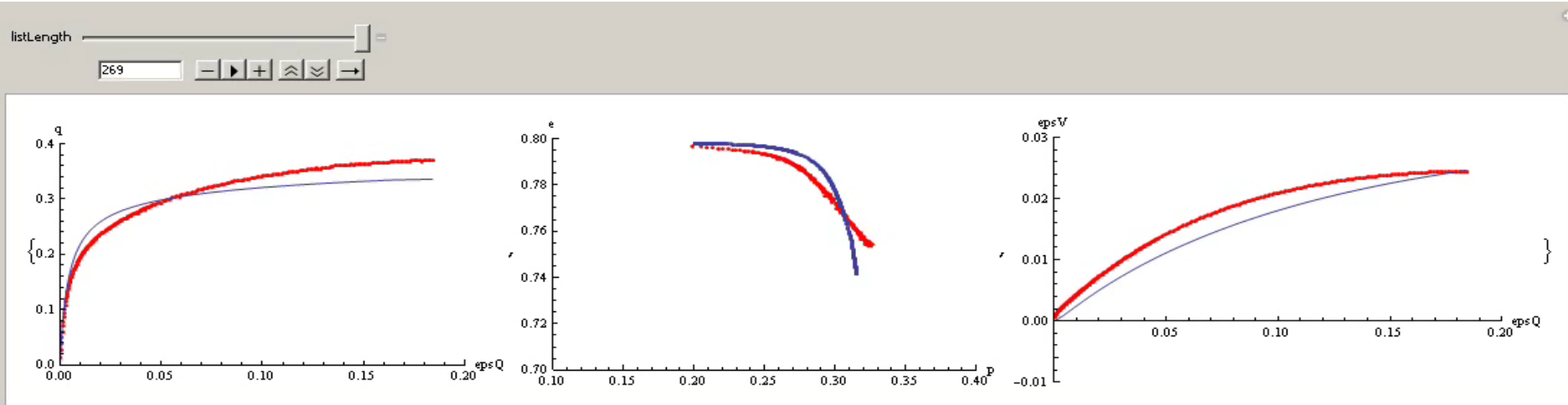
CID POKUSI – Erksak pijesak



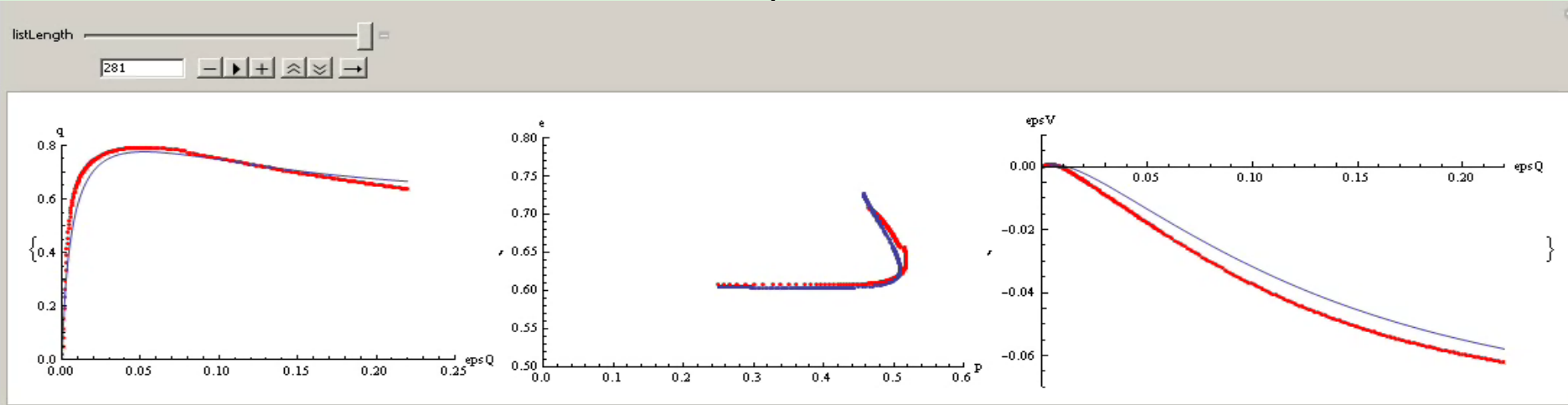
Izotropna kompresija u troosnom pokusu (Erksak pijesak)

CID POKUSI – Erksak pijesak

CID – rahli uзорak

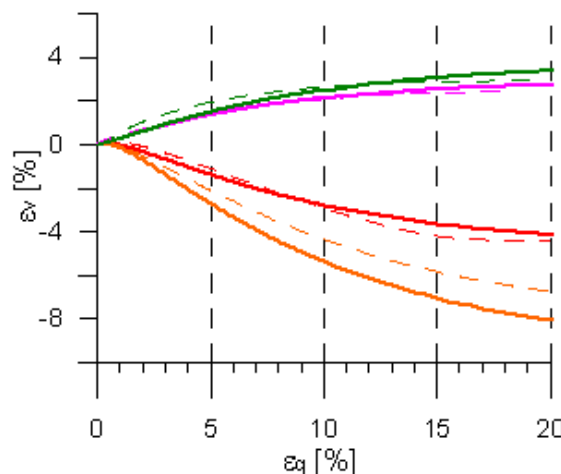
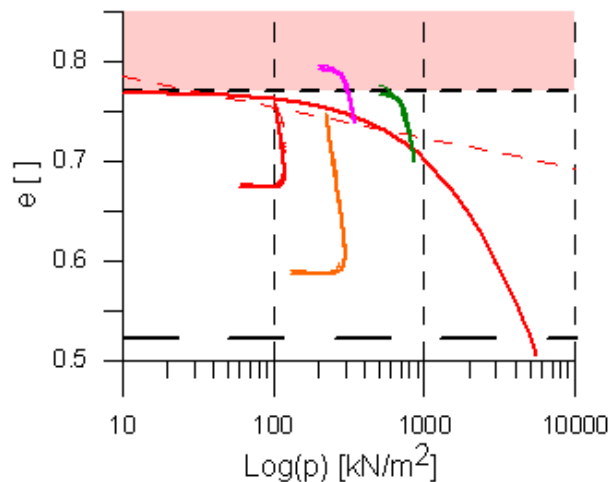
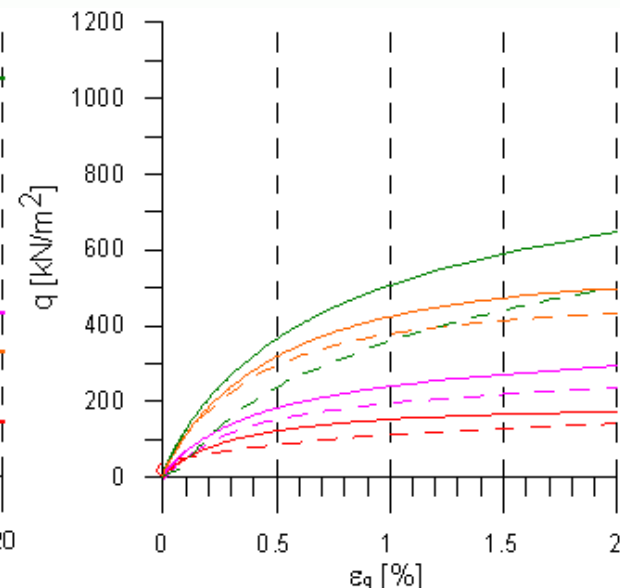
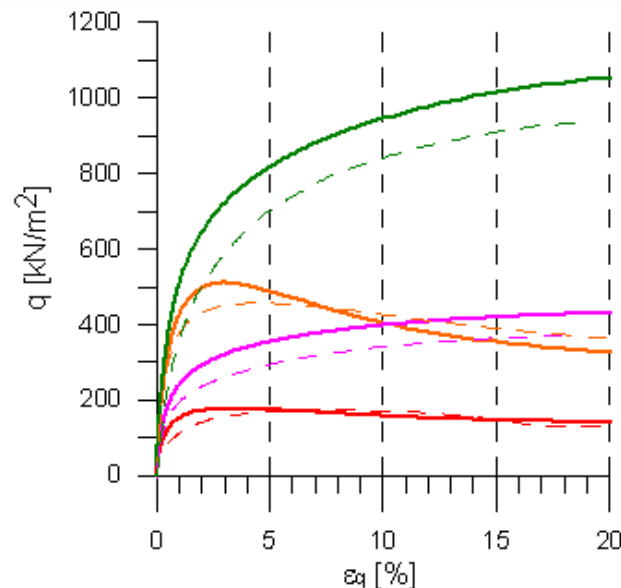
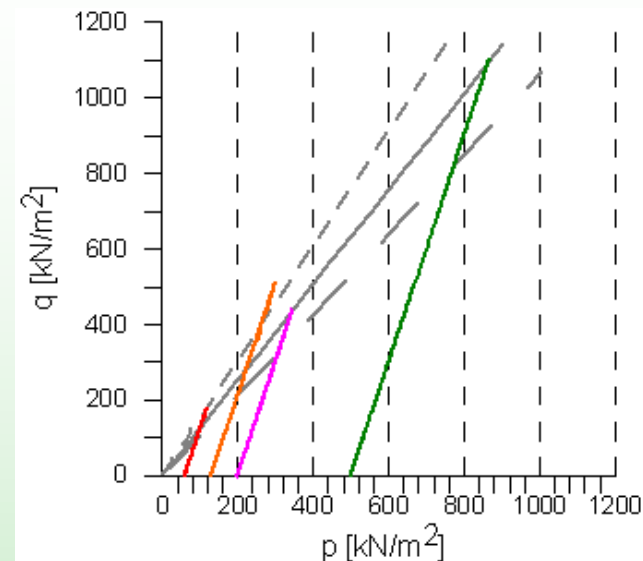


CID – zbijeni uзорak



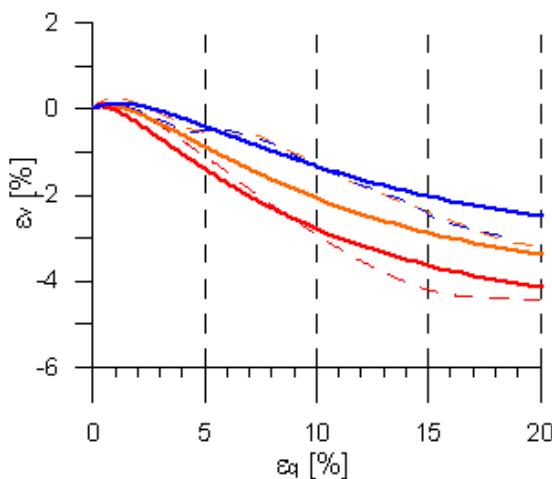
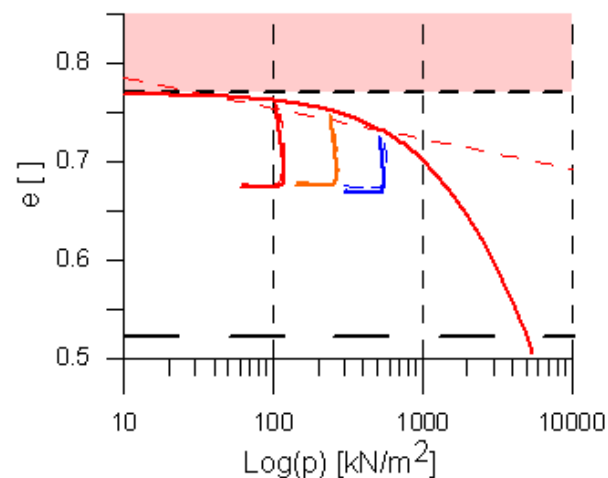
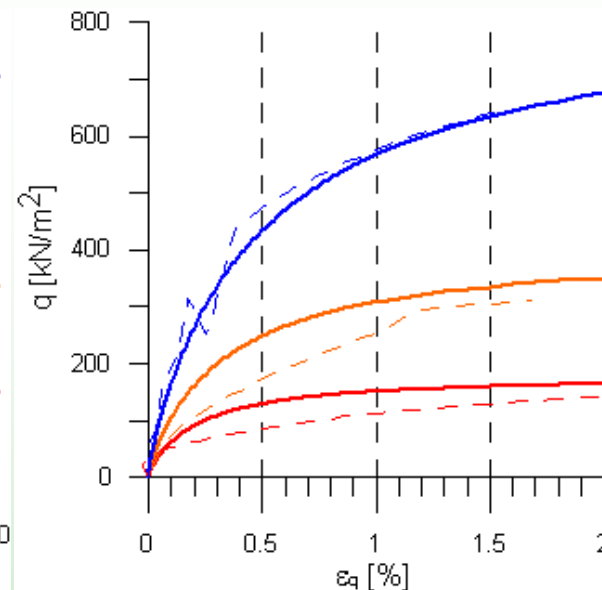
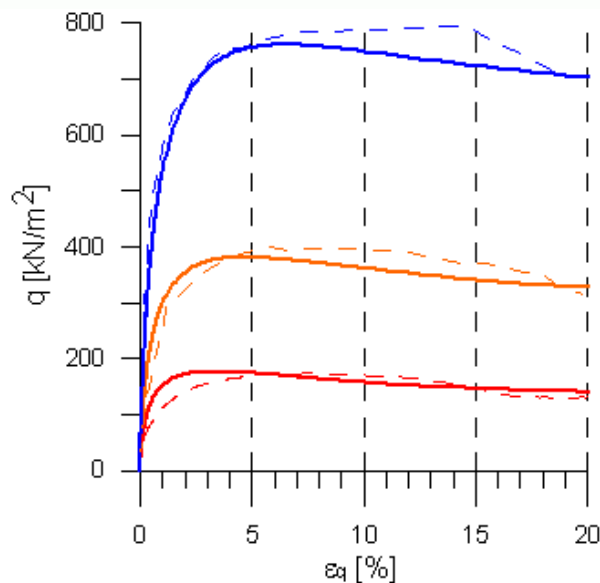
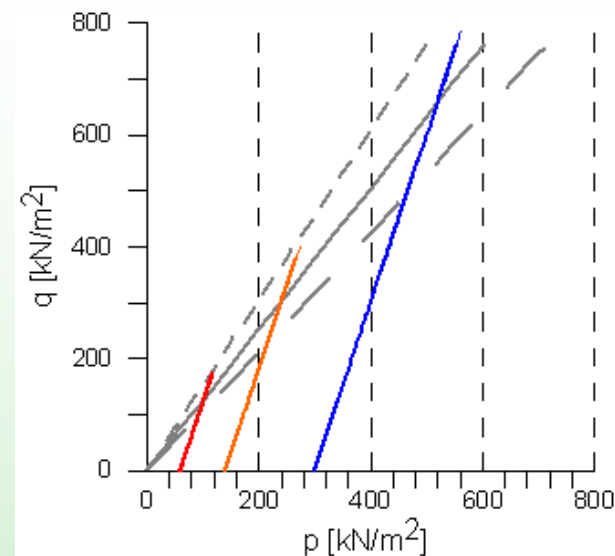
Simulacije CID pokusa Erksak pijesak (Sokolić 2010)

CID POKUSI – Erksak pijesak



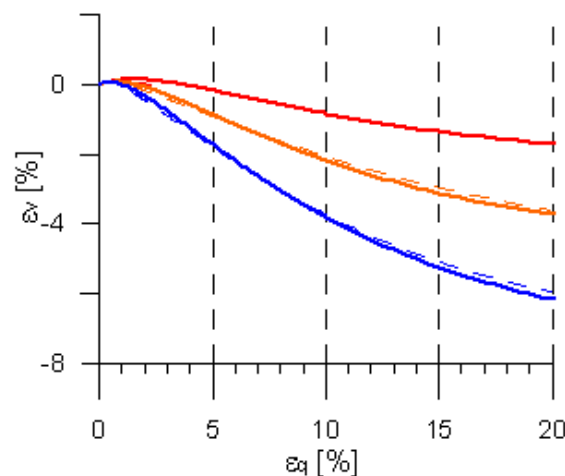
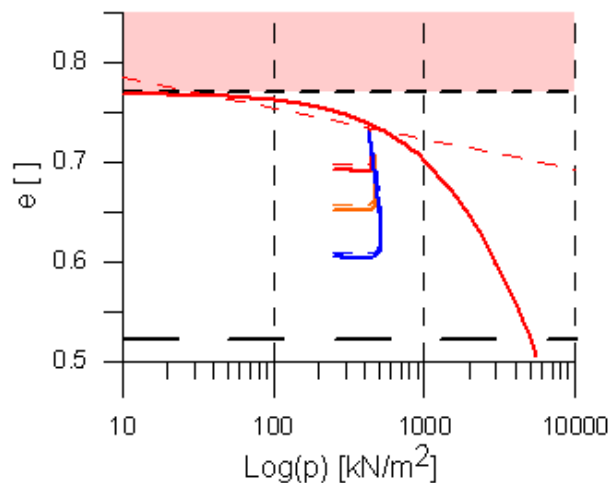
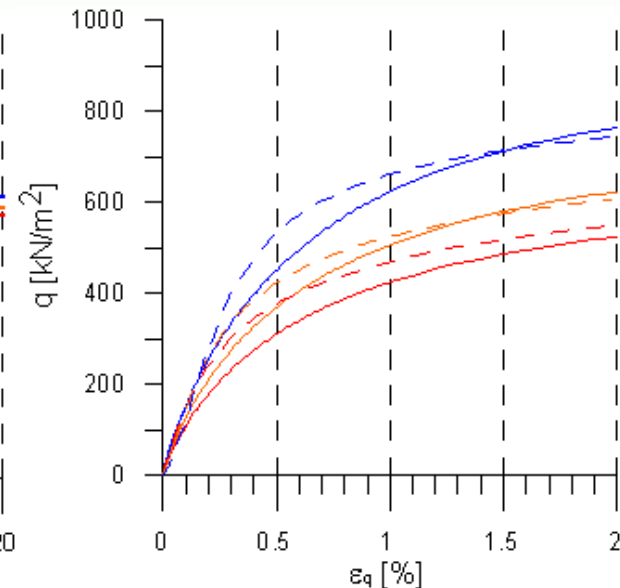
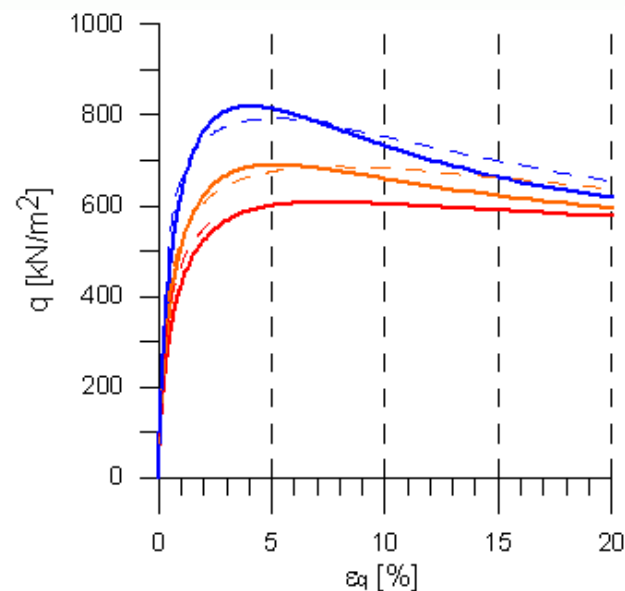
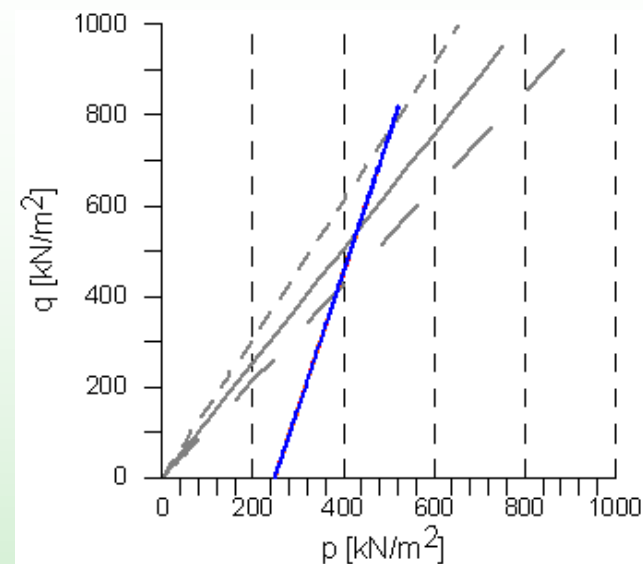
**USPOREDBA
PONAŠANJA RAHLIH I
ZBIJENIH UZORAKA
PIJESKA U CID
POKUSU
(Erksak pijesak)**

CID POKUSI – Erksak pijesak



**UTJECAJ STANJA
ZBIJENOSTI NA
PONAŠANJE PIJESKA
U CID POKUSU
(Erksak pijesak)**

CID POKUSI – Erksak pijesak



**UTJECAJ STANJA
NAPREZANJA NA
PONAŠANJE PIJESKA
U CID POKUSU
(Erksak pijesak)**