

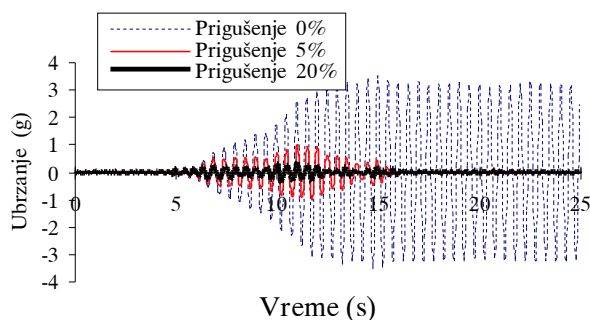
### 3. PONAŠANJE PRI ZEMLJOTRESU NELINEARNIH SISTEMA SA JEDNIM STEPENOM SLOBODE

#### UVOD

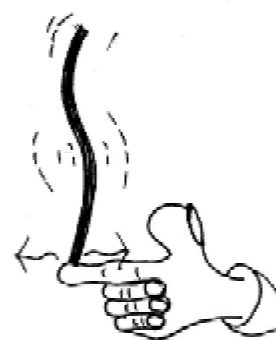
Nivo opterećenja elastične konstrukcije usled zemljotresa može, u slučaju izuzetno značajnih objekta da se usvoji kao *projektno opterećenje* konstrukcije pri zemljotresu, ili da se kontrolisano smanji. Klasični koncept smanjenja nivoa opterećenja zasniva se na dopuštanju *nelinearnog odgovora* konstrukcije, uz pojavu *kontrolisanih oštećenja konstrukcije*. Nakon objašnjenja osnovnih pojmova dinamike *elasto-plastičnih sistema*, ilustruje se postupak formiranja *nelinearnog spektra* ubrzanja, uspostavljanjem veze *raspoložive duktilnosti pomeranja* konstrukcije i *dozvoljenog nivoa redukcije* seizmičkog opterećenja. Polazeći od nelinearnog spektra ubrzanja, izložen je *opšti algoritam* projektovanja seizmički otpornih konstrukcija, koji je osnova svih propisa. Na kraju, osim jednostavnog kriterijuma iscrpljenja konstrukcije dostizanjem *kapaciteta deformacija pri monotonom statičkom opterećenju*, formulisan je i *kombinovani kriterijum*, kao podloga za definisanje *ekvivalentne duktilnosti pomeranja*, čime se obuhvata i ciklična istorija deformacija konstrukcije pri zemljotresu.

#### 3.1 TRADICIONALNA - SAVREMENA ZAŠTITA KONSTRUKCIJA OD ZEMLJOTRESA

Nivo seizmičkog opterećenja pri *elastičnom odgovoru konstrukcija* obično je izuzetno visok, i teško ga je konstrukcijskim merama prihvatiti. Pri tome, već je uvođenje viskoznog prigušenja od  $\xi = 5\%$  značajno, ali ne i dovoljno ublažilo efekte zemljotresa, slika 3.1 - pseudo ubrzanje konstrukcije normalizovano na ubrzanje zemljine teže.



Slika 3.1 Efekat viskoznog prigušenja,  $T=0,5s$

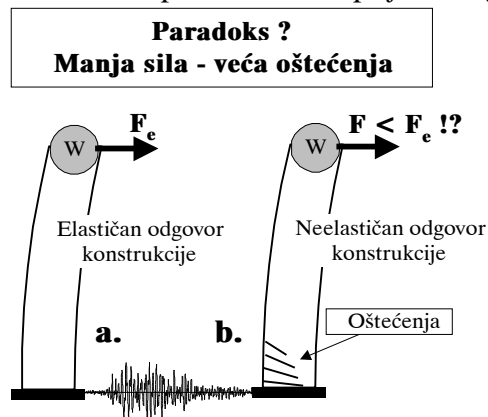


Slika 3.2 "Stabilan sistem" pri kretanju

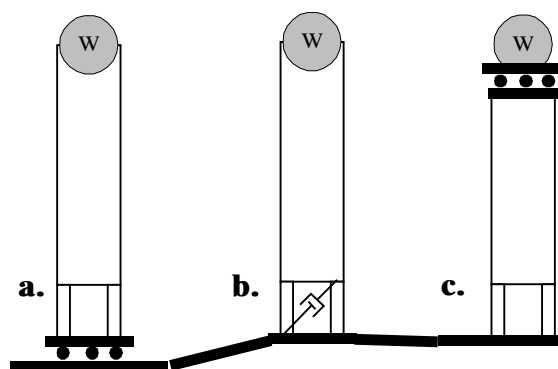
Problem ima i svoju ekonomsku stranu, kao i uvek - uložiti sredstva pri građenju za nešto što se možda neće ni desiti, ili prihvatiti rizik oštećenja i eventualnih popravki? Pri razmišljanju kako da se konstrukcija racionalno *adaptira zemljotresu*, da se *zaštiti od preopterećenja* usled *prinudnih pomeranja* izazvanih pomeranjem tla koje ne možemo da sprečimo, treba imati u vidu da su pri dinamičkim pojavama mogući i *konstrukcijski sistemi - privremeni mehanizmi* koji su "stabilni" dok traje kretanje, slika 3.2. Kod realnih konstrukcija, potrebno je ipak obezbediti stabilnost sistema pre i nakon prestanka kretanja, kao i ograničiti moguću *trajnu deformaciju* sistema.

*Tradicionalni koncept* smanjenja efekata zemljotresa zasniva se na umanjenju seizmičkog opterećenja putem *adaptacije krutosti osnovne noseće konstrukcije* pomeranjima

usled zemljotresa, slika 3.3, što podrazumeva pojavu određenog nivoa oštećenja konstrukcije - *neelastičan tj. nelinearan odgovor konstrukcije*. Usvojeni iznos prigušenja od 5% takođe podrazumeva pojavu naglašenijih prslina.



Slika 3.3 Tradicionalni koncept građenja i zaštite od zemljotresa



Slika 3.4 Savremeni koncepti građenja i zaštite od zemljotresa

Deluje kao paradoks da konstrukcija sa manjim opterećenjem  $F < F_e$  ima veća oštećenja, slika 3.3.b, ali redosled je obrnut, opterećenje je niže jer je upravo pojavom oštećenja *snižena krutost konstrukcije*, tipično za uticaje *prinudnih pomeranja*.

Ako se ne može sprečiti pomeranje tla, konstrukcijski je moguće u horizontalnoj ravni preseći, *izolovati temelj konstrukcije* od kretanja tla, konceptualni primer *savremene zaštite konstrukcija* - kuća "na točkovima" na slici 3.4.a. Ovaj koncept je efikasan u slučaju krutih konstrukcija, produžava se period oscilovanja i smanjuje se efektivna sila  $P_{ef}$ .

Ono što je bitno, treba ublažiti *pobuđivanje kretanja mase* usled propagiranja oscilacija kroz konstrukciju. Ako je glavna masa konstrukcije visoko, stubovi mogu da se zaštite postavljanjem *dinamičke izolacije* ispod mase, primer konstrukcija krovova velikih raspona na neoprenskim ležištima na vrhu stubova, konceptualno rešenje prema slici 3.4.c. U oba navedena slučaja, relativna pomeranja mase konstrukcije u odnosu na podlogu - *smicanje ležišta* često je merodavan kriterijum za realizaciju zaštite.

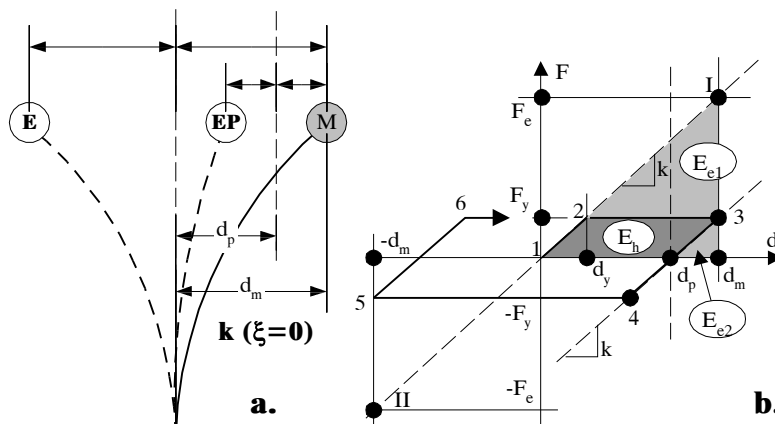
Zaštita konstrukcija može da se ostvari i intervencijama koje modifikuju prigušenje kretanja. Efekti prigušenja mogu da se pojačaju dodavanjem posebnih "*dampere*" - *prigušivača*, slika 3.4.b, sistem pogodan u slučaju fleksibilnih konstrukcija.

*Tradicionalni način građenja* i zaštite još uvek preovlađuje, i u propisima pa i u praksi, tako da se naredne analize odnose na ovaj koncept. Ako pri prinudnim pomeranjima treba ograničiti nivo naprezanja nelinearnim odgovorom konstrukcije, tada je *elasto-plastičan model* odgovora konstrukcije svakako najjednostavniji.

### 3.2 OSNOVI DINAMIKE ELASTO-PLASTIČNIH SISTEMA SA JEDNIM STEPENOM SLOBODE

Na slici 3.5 ilustrovan je sistem sa jednom masom  $m$  za koji se pretpostavlja da je konstrukcijskim merama obezbeđena elasto-plastična veza sile  $F$  i pomeranja  $d$  vrha konstrukcije.

Pri *prinudnom pomeranju* vrha  $d_m$ , reakcija *elastičnog sistema* sa krutošću  $k$  iznosila bi  $F_e = kd_m$ , tačka I na slici 3.5.b. Pri pomeranju  $d_m$ , akumulirana potencijalna energija jednaka je zbiru površina  $E_{e1} + E_{e2} + E_h$ , slika 3.5.b. Ukoliko se sistem oslobodi oslonca, nastupiće oscilacije duž prave I-II, sa periodom oscilovanja  $T = 2\pi\sqrt{(m/k)}$ , uz stalnu izmenu

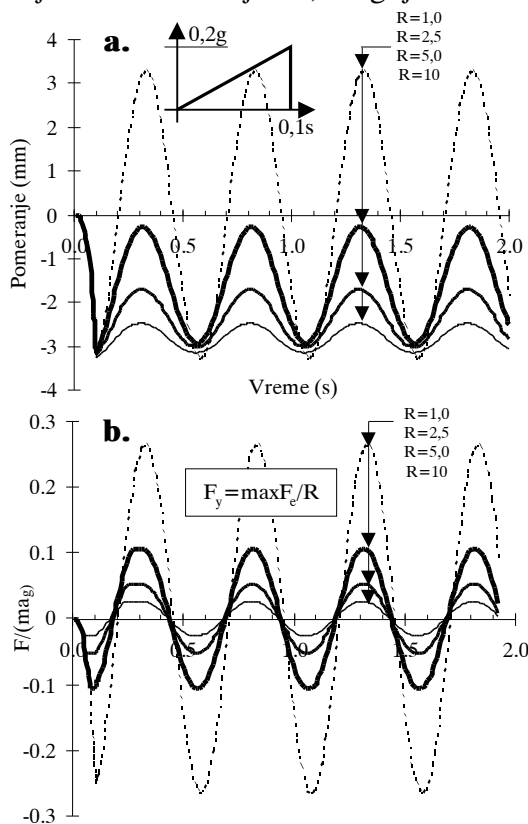


Slika 3.5 Dinamika elasto-plastičnog - EP sistema

elastičnog opterećenja. Pri prinudnom pomeranju  $d_m$ , elasto-plastičan sistem (EP - sistem) sa istom inicijalnom krutošću  $k$  "stići će" u tačku 3 na slici 3.5.b.

Akumulirana potencijalna energija EP sistema jednaka je površini  $E_{e2}$ , jer je znatan deo unete energije  $E_h$  nepovratno izgubljen proizvođenjem trajne deformacije  $d_p$ . Oslobođanjem od oslonca, EP sistem će da osciluje u "pomeranom položaju", sa smanjenim ubrzanjem i amplitudom, po pravoj 3-4 odnosno između tačaka M-EP na slici 3.5.a. Kako su masa i inicijalna krutost isti, to je i period oscilovanja EP sistema jednak periodu oscilovanja elastične konstrukcije.

Zavisno od nosivosti  $F_y$  odnosno stepena redukcije opterećenja  $R$ , EP sistem akumulira manje potencijalne energije - delimično "zaboravlja odakle je krenuo", adaptira se trajnim deformacijama, reaguje relativno "flegmatično".



Slika 3.6 Odgovor EP sistema na impuls ubrzanja tla

kinetičke i potencijalne energije. Ukoliko nema prigušenja, amplitude oscilacija jednake su početnom pomeranju  $d_m$  - elastičan sistem "se seća" stanja iz koga je izveden i reaguje "kolerično".

Pretpostavimo da je elastični nivo opterećenja  $F_e$  konstrukcijski neprihvatljiv, i da želimo da ga smanjimo na iznos  $F_y = F_e/R$ , gde je  $R$  usvojena vrednost faktora redukcije

Ukoliko je u pitanju monotoni statički opit cikličnih deformacija, pri "rasterećenju", pomeranju iz tačke 3 u suprotnom smeru, odgovor EP sistema opisan je "putem" 3-4-5-6 itd.

### Primer 3.1.....

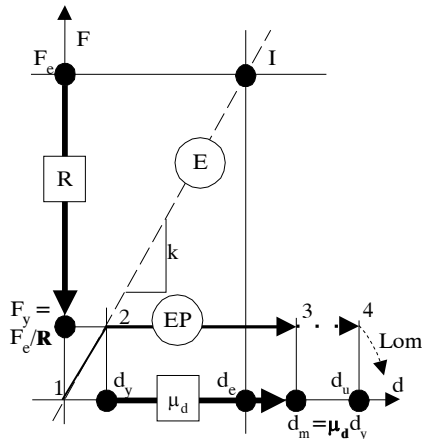
Za sistem sa jednom masom i periodom oscilovanja  $T=0,5s$ , odrediti odgovor sistema na impuls ubrzanja tla koji linearno raste od  $a_g(t=0)=0$  do  $a_g(t=0,1s)=0,2g$ , slika 3.6.a. Za vrednosti faktora redukcije usvojiti  $R=1$  (elastičan sistem), 2,5, 5 i 10, a za prigušenje  $\xi = 0$ .

Za rešenje nelinearnog dinamičkog problema upotrebljen je program DIANA - TNO Delft /5/. Zadatak je rešen primenom Njutn-Rapsonove iterativne procedure /3/,/4/. Na slici 3.6.a prikazana su relativna pomeranja, a na slici 3.6.b opterećenje odgovarajuće konstrukcije, normalizovano na proizvod mase i maksimalnog ubrzanja tla - pseudo ubrzanje konstrukcije. Kao što je i nagovešteno, nakon prestanka kretanja

tla ( $t=0,1s$ ), EP sistemi osciluju u pomerenom - deformisanom položaju, sa smanjenim ubrzanjem odnosno opterećenjem sistema, limitiranim usvojenom nosivošću sistema  $F_y$ .

### 3.3 ODGOVOR NA ZEMLJOTRES ELASTO-PLASTIČNIH SISTEMA SA JEDNIM STEPENOM SLOBODE

Pretpostavimo da je poznat odgovor elastične konstrukcije sa krutošću  $k$  na dati zapis ubrzanja tla, maksimalno seizmičko opterećenje  $F_e$  i relativno pomeranje  $d_e$ , slika 3.7. Potrebno je odrediti tok i maksimalnu vrednost pomaranja  $d_m$  EP sistema sa istom inicijalnom krutošću  $k$ , ali sa redukovanom nosivošću  $F_y = F_e / R$  i odgovarajućim pomerenjem  $d_y$  na granici dostizanja nosivosti tj. granici elastičnosti.



Slika 3.7 Osnovni parametri EP modela

Odnos  $\mu_d = d_m / d_y$  naziva se *potrebna duktilnost pomaranja sistema*. Da bi se obezbedila stabilnost konstrukcije, *kapacitet pomaranja konstrukcije*  $d_u$  treba da je veći od očekivanog maksimalnog pomaranja  $d_m$  pri zemljotresu. Cilj nelinearnih dinamičkih analiza najčešće je utvrđivanje *potrebne duktilnosti pomaranja* pri usvojenoj redukciji nosivosti sistema.

Jednačine kretanja (2.6) i dalje važe na početnom delu 1-2, dok na delu 2-3 glasi

$$md'' + cd' + F_y = -md''_g \quad (3.1)$$

a na delu 3-4, slika 3.5.b

$$md'' + cd' + k(d-d_p) = -md''_g \quad (3.2)$$

#### Primer 3.1

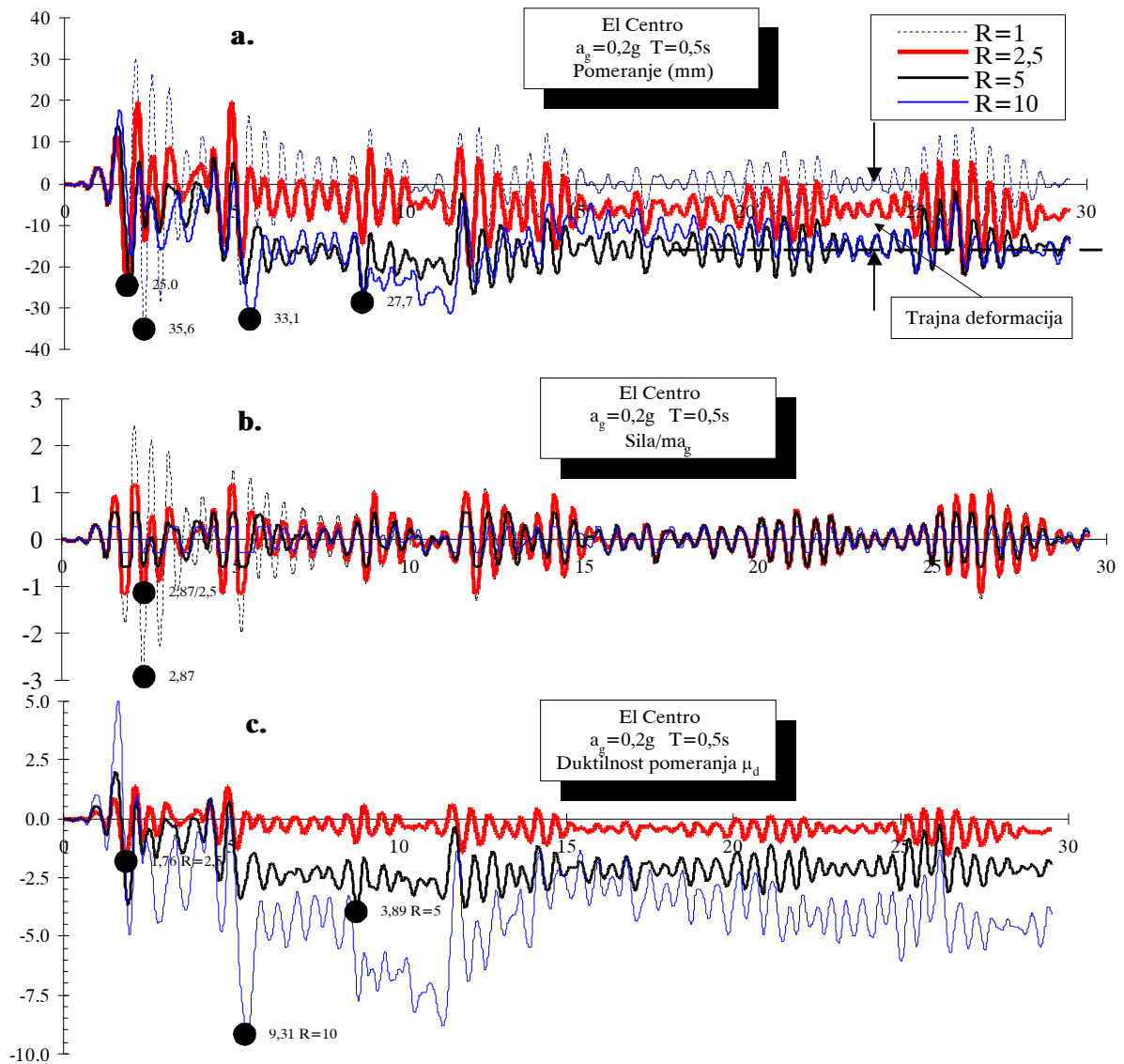
Za zapise *El Centro*, *Petrovac* i *Ulcinj*, analizirati odgovor elasto - plastičnih sistema sa periodom oscilovanja  $T=0,5, 1,5$  i  $3,0$  sekunde, za vrednosti faktora redukcije  $R=2,5, 5$  i  $10$ . Za sva tri zapisa, za maksimalno ubrzanje tla usvojiti  $a_g=0,2g$ .

U prvom koraku određeno je maksimalno opterećenje elastičnog sistema  $F_e$ , i potom su formirani elasto-plastični sistemi sa redukovanom nosivošću u odnosu na zahtevanu nosivost elastičnog sistema  $F_e$ . U Tabeli 1 dat je prikaz rezultata analiza za sve zapise i periode oscilovanja, dok je na slici 3.8 prikazan vremenski odgovor konstrukcije sa periodom  $T=0,5$  sekundi usled zemljotresa *El Centro*. Kriva  $R=1$  predstavlja odgovor elastične konstrukcije, koji je prethodno prikazan i na slici 2.4.

Tabela 1

Period T

	R	0.50				1.50				3.00			
		A/a <sub>g</sub>	D/a <sub>g</sub>	μ <sub>d</sub>	DM	A/a <sub>g</sub>	D/a <sub>g</sub>	μ <sub>d</sub>	DM	A/a <sub>g</sub>	D/a <sub>g</sub>	μ <sub>d</sub>	DM
<b>El Centro</b>	1.0	2.87	0.018		0.00	0.59	0.034		0.00	0.39	0.088		0.00
	2.5	1.15	0.013	1.76	0.96	0.24	0.032	2.40	1.21	0.15	0.073	2.08	1.05
	5.0	0.58	0.014	3.89	1.35	0.12	0.037	5.42	1.77	0.08	0.054	3.03	0.92
	10.0	0.29	0.017	9.31	2.05	0.06	0.055	16.30	2.85	0.04	0.078	8.88	1.35
<b>Petrovac</b>	1.0	4.85	0.031			0.27	0.015			0.11	0.024		
	2.5	1.95	0.019	1.54	0.92	0.11	0.022	3.61	1.68	0.04	0.019	2.02	0.98
	5.0	0.97	0.012	1.88	0.90	0.05	0.011	3.57	1.42	0.02	0.014	2.85	0.90
	10.0	0.49	0.015	4.75	1.12	0.03	0.010	6.42	1.88	0.01	0.016	6.85	1.29
<b>Ulcinj</b>	1.0	1.97	0.012			2.18	0.124			0.34	0.115		
	2.5	0.79	0.029	5.91	3.01	0.87	0.100	2.02	0.98	0.20	0.125	2.72	1.23
	5.0	0.40	0.052	20.80	6.64	0.44	0.098	3.94	1.06	0.10	0.087	3.80	0.97
	10.0	0.20	0.071	57.30	9.43	0.22	0.127	10.20	1.40	0.05	0.062	5.42	0.91



Slika 3.8 Odgovor EP sistema na zemljotres El Centro

Relativna pomeranja EP sistema u granicama su pomeranja koja dostiže elastičan sistem (35,6mm), pri čemu je najmanje pomeranje sistema sa faktorom redukcije  $R=2,5$  (25,0mm = 70% pomeranja elastičnog sistema), slika 3.8.a.

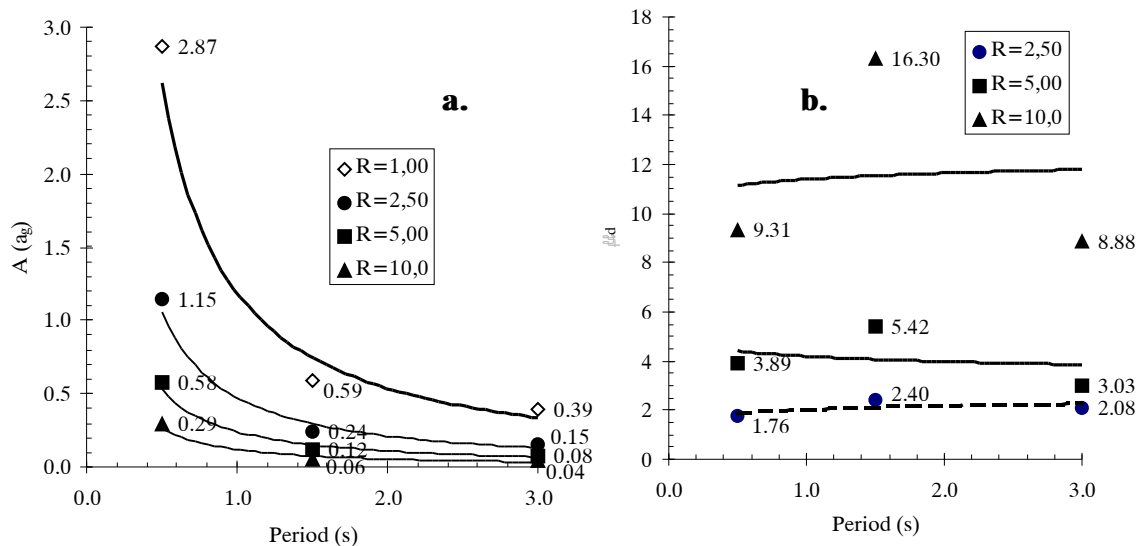
Kao što je i zadato, maksimalno opterećenje EP sistema ne prelazi propisanu nosivost u odnosu na elastičan sistem, slika 3.8.b, normalizovano na  $ma_g$ .

Deljenjem pomeranja  $d(t)$  u nekom trenutku vremena sa odgovarajućom vrednošću pomeranja na granici elastičnosti  $d_y$  za svaki od EP modela, dobija se tok promene faktora duktilnosti pomeranja  $\mu_d(t)$ , slika 3.8.c. Karakteristično je da maksimalna potrebna duktilnost pomeranja EP sistema raste sa veličinom faktora redukcije elastičnog opterećenja  $R$ . Smanjenje nosivosti "plaća se" povećanim zahtevima za obezbeđenje post-elastičnih deformacija konstrukcije. Zahtevane vrednosti potrebne duktilnosti pomeranja  $\mu_d$  relativno su bliske usvojenim vrednostima faktora redukcije opterećenja  $R$ , razlike su do 30%.

U Tabeli 1, prikazane su maksimalne vrednosti odgovora konstrukcija, maksimalno pseudo ubrzanje  $A/a_g$  i pomeranje  $D/a_g$  normalizovani na maksimalno ubrzanje tla

$a_g = 0,2g$ . Pored maksimalne potrebne duktilnosti pomeranja  $\mu_d$ , prikazane su i vrednosti indeksa oštećenja  $DM$  konstrukcije, koji će biti komentarisani kasnije, u poglavlju 3.6.

Na slici 3.9.a prikazana je zavisnost pseudo ubrzanja  $A(a_g)$  konstrukcije u funkciji perioda oscilovanja i faktora redukcije  $R$  za zapis El Centro. Kroz sračunate vrednosti za tri perioda oscilovanja provučena je regresiona kriva. Maksimalno ubrzanje pa i opterećenje konstrukcije opadaju sa porastom faktora redukcije  $R$  kao i sa porastom perioda  $T$ .



Slika 3.9 Zapis El Centro: a) pseudo ubrzanje, b) potrebna duktilnost pomeranja

Na slici 3.9.b prikazana je zavisnost potrebne duktilnosti pomeranja  $\mu_d$  u funkciji faktora redukcije  $R$  i perioda oscilovanja  $T$  za zapis El Centro. U području perioda dužih od  $t=0,5$  sekundi, trend je da potrebna duktilnost ne zavisi od perioda oscilovanja, kao i da vrednost potrebne duktilnosti pomeranja teži usvojenoj vrednosti faktora redukcije  $R$ .

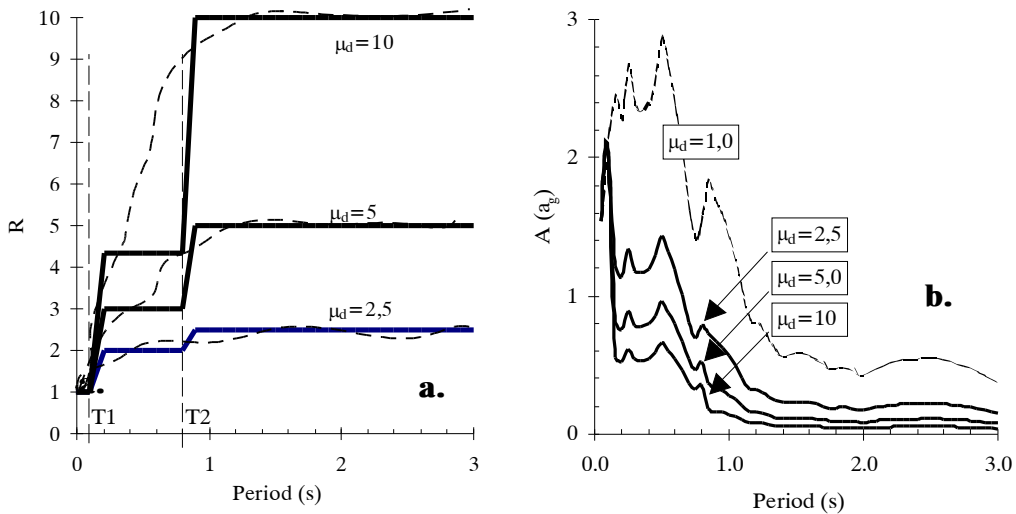
Izneta zapažanja važe i za zapis Petrovac, Tabela 1, dok odgovor konstrukcije sa periodom  $T=0,5s$  na zapis Ulcinj pokazuje potpuno odstupanje.

### 3.4 NELINEARNI SPEKTRI ODGOVORA EP SISTEMA

U praksi je obično poznata *obezbeđena vrednost faktora duktilnosti pomeranja*  $\mu_d$ , a traži se *dozvoljena vrednost faktora redukcije* opterećenja  $R$ , inverzan problem.

Analogno prethodnoj analizi, ali uz malo više truda, mogu da se formiraju inverzne krive  $R(\mu_d, T)$ , crtkaste linije na slici 3.10.a. Sistematskom parametarskom analizom različitih EP sistema podvrgnutih različitim zapisima ubrzanja tla, moguće je ustanoviti pogodne aproksimacije ove zavisnosti, od kojih je jedna, možda i najpoznatija prikazana na slici 3.10.a, puna linija, za vrednosti faktora duktilnosti pomeranja konstrukcije  $\mu_d=2,5, 5$  i  $10$ .

U području izrazito kratkih perioda oscilovanja, ispod vrednosti  $T_1$ , vrednost faktora redukcije iznosi  $R=1$ , za sve obezbeđene duktilnosti pomeranja. To je tzv. oblast "*jednakih ubrzanja konstrukcije i tla*", karakteristična za izrazito krute konstrukcije koje se moraju projektovati na praktično elastičan odgovor konstrukcije.

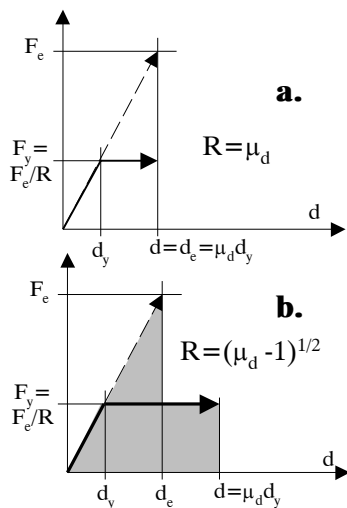


Slika 3.10 a) Zavisnost faktora redukcije  $R$  od obezbedene duktilnosti pomeranja; b) nelinearni spektar pseudo ubrzanja konstrukcije

U području kraćih i srednjih perioda  $T=T_1 - T_2$ , dozvoljena vrednost faktora redukcije  $R$  može da se aproksimira izrazom

$$R = (\mu_d - 1)^{1/2} \quad (3.3)$$

U području dužih perioda,  $T > T_2$ , za vrednost faktora redukcije može da se usvoji da je jednaka vrednosti obezbedenog faktora duktilnosti pomeranja



Slika 3.11 Interpretacija faktora redukcije  $R$  deformacija".

$$R = \mu_d \quad (3.4)$$

Ukoliko se vrednosti elastičnog spektra ubrzanja ( $R=1$ ) podele odgovarajućim vrednostima faktora redukcije  $R(\mu_d, T)$ , dobija se *nelinearni spektar pseudo ubrzanja konstrukcije*, primer za zapis El Centro na slici 3.10.b.

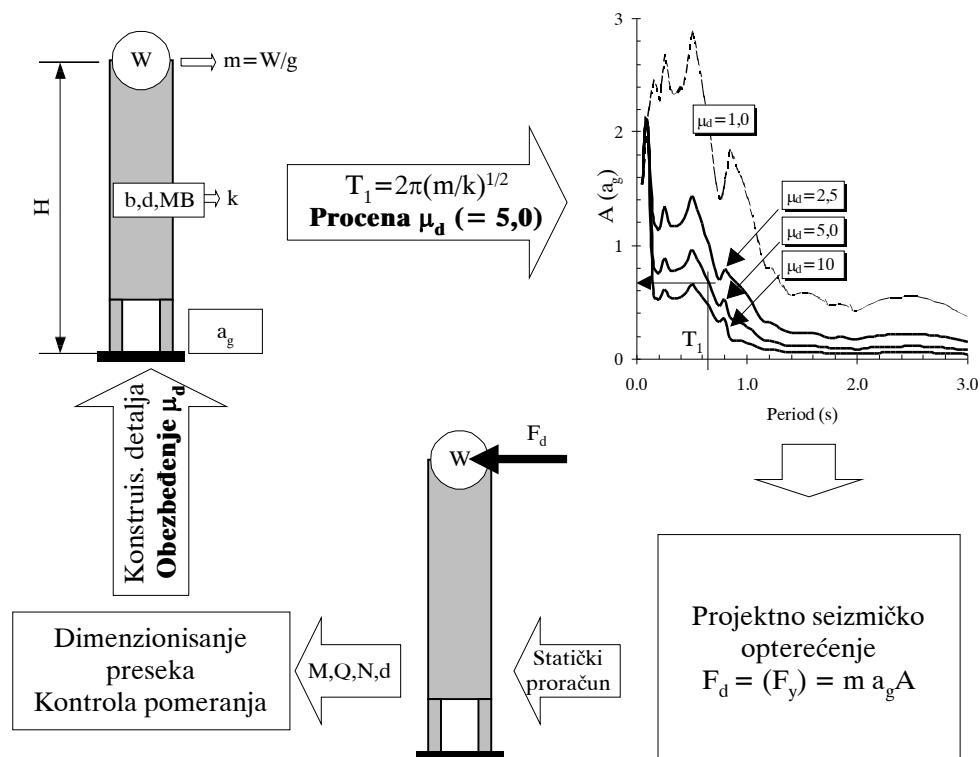
Na slici 3.11 prikazana je uobičajena interpretacija navedenih veza. Iz sličnosti trouglova dijagrama  $F-d$ , može da se zaključi da identitet  $R = \mu_d$  ustvari znači da je *pomeranje EP sistema jednako pomeranju elastičnog sistema sa istom početnom krutošću*, fundamentalni zaključak na kome će se zasnivati propisi, slika 3.11.a.

Prema slici 3.11.b, relacija  $R = (\mu_d - 1)^{1/2}$  može da se interpretira kao uslov jednakih površina ispod dijagrama  $F-d$  elastičnog i EP sistema, otuda i naziv "*uslov jednakih energija*".

### 3.5 KONCEPT NELINEARNOG PRORAČUNA SISTEMA SA JEDNIM STEPENOM SLOBODE

Na osnovu rezultata dosadašnjih analiza, može da se uspostavi koncept proračuna odgovora konstrukcija na dejstva zemljotresa, koji se zasniva na poznatim *nelinearnim spektrima odgovora* konstrukcija na dejstva zemljotresa, prema algoritmu na slici 3.12.

Sa poznatim podacima o geometriji, materijalu, opterećenju konstrukcije kao i maksimalnom očekivanom ubrzanju tla  $a_g$ , projektant može da sračuna period oscilovanja  $T_1$ . Na osnovu tipa konstrukcijskog sistema, nivoa aksijalnog opterećenja i predviđenih detalja armiranja, usvaja se *obezbeđena duktilnost pomeranja*  $\mu_d$ , recimo  $\mu_d = 5$ . Na osnovu sračunatog perioda i duktilnosti, sa referentnog nelinearnog spektra ubrzanja očitava se vrednost ubrzanja konstrukcije  $A(a_g)$ , pa je projektno opterećenje jednako proizvodu mase, ubrzanja tla i normalizovanog ubrzanja,  $F_d = (F_y) = m a_g A$ .



Slika 3.12 Koncept proračuna konstrukcija na bazi nelinearnog spektra ubrzanja konstrukcije

Sa projektним opterećenjem vrši se "statički proračun", određuju se naprezanja delova konstrukcije, dimenzionišu preseki i proverava stvarno pomeranje konstrukcije pri zemljotresu, polazeći od pomeranja na granici elastičnosti. Konačno, vrši se konstruisanje detalja tako da se *obezbedi pretpostavljena vrednost duktilnosti pomeranja konstrukcije*.

U prethodnom poglavlju, nelinearni spektar ubrzanja konstrukcije konstruisan je razmatrajući *elasto-plastični model* odgovora konstrukcije. Izloženi algoritam se principijelno ne menja i ako se odgovor konstrukcije modelira na neki drugi način, koji bolje opisuje *realni odgovor* konstrukcija od armiranog betona, na primer. Osnov koncepta je da, za poznatu *duktilnost pomeranja* konkretne konstrukcije, *nosivost nelinearnog sistema* može da se redukuje u odnosu na *maksimalni odgovor elastičnog sistema*.

### 3.6 AKUMULACIJA OŠTEĆENJA I EKVIVALENTNA DUKTILNOST POMERANJA

Rezultat dosadašnjih razmatranja je da je definisan odgovor elastične, kao i elasto-plastične konstrukcije na zemljotres - pomeranje  $d_m$  odnosno potrebna duktilnost pomeranja  $\mu_d$ , definisana kao odnos *maksimalnog pomeranja*  $d_m$  nelinearnog sistema pri zemljo-



tresu i pomeranja  $d_y$  pri dostizanju nosivosti nelinearnog sistema. Međutim, koliki treba da bude kapacitet pomeranja konstrukcije  $d_u$  pri monotonom statičkom opterećenju, da bi nivo oštećenja konstrukcije nakon zemljotresa bio u prihvatljivim, željenim granicama? - nije definisan kriterijum prihvatljivog odgovora nelinearne konstrukcije pri zemljotresu.

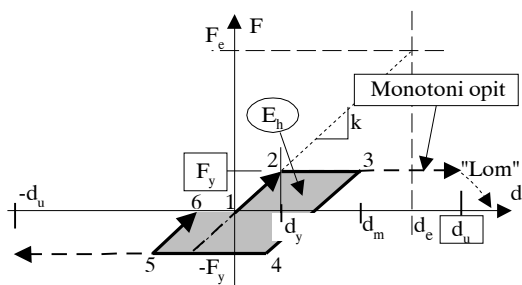
Kao najjednostavniji kriterijum može da se usvoji odnos maksimalnog pomeranja  $d_m$  pri zemljotresu i obezbeđenog kapaciteta pomeranja  $d_u$  konstrukcije pri monotonom statičkom prinudnom pomeranju, slika 3.13. Tada indeks oštećenja konstrukcije  $DM$  iznosi

$$DM = d_m / d_u = \mu_d / \mu_u < 1 \quad (3.5)$$

gde je  $\mu_u = d_u / d_y$  duktilnost pomeranja pri dostizanju loma, iscrpljenja nosivosti konstrukcije. Ako je pri zemljotresu indeks oštećenja dostigao vrednost  $DM=1$ , konstrukcija je dovedena u stanje kolapsa. Projektant može da utiče na nivo zaštite konstrukcije od oštećenja izborom odgovarajuće veće vrednosti  $d_u$ .

Kriterijum (3.5) prihvatljiv je u slučaju odgovora konstrukcija sa jednim izraženim pomeranjem preko granice elastičnosti  $d_y$ , i sa zanemarljivom akumulacijom oštećenja zbog većeg broja ciklusa post-elastičnih deformacija.

Međutim, u situacijama kada konstrukcija trpi veći broj značajnijih ciklusa post-elastičnih deformacija, akumulacija oštećenja u toku dužeg trajanja jakog dela zemljotresa može da "iscrpi" konstrukciju. U takvim slučajevima, kao mera oštećenja konstrukcije često se usvaja kombinovana vrednost indeksa oštećenja u obliku



Slika 3.13 Indeks oštećenja  $DM$

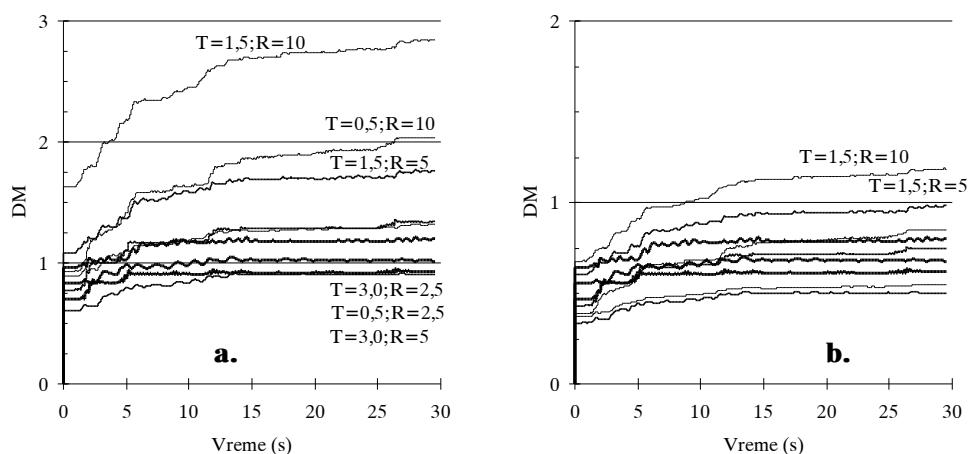
$$DM = \frac{d_m}{d_u} + \beta \frac{\Sigma E_h}{F_y d_u} \quad (3.6)$$

gde je  $\Sigma E_h$  integral potrošene energije - histeretijske krive EP sistema, slika 3.13, čija vrednost raste sa dužinom trajanja zemljotresa odnosno sa brojem ciklusa,  $F_y$  je nosivost sistema, dok je prvi član  $d_m / d_u$  već definisan izrazom (3.5.). Vrednost faktora  $\beta$  utvrđuje se eksperimentalno, a za kvalitativnu analizu odgovora AB konstrukcija može da se usvoji  $\beta=0,15/6$ .

Kao i ranije, vrednost  $DM=1$  definiše potpuno iscrpljenje nosivosti konstrukcije.

### Primer 3.2.....

Na slici 3.14 prikazan je tok promene vrednosti indeksa oštećenja  $DM$  u toku



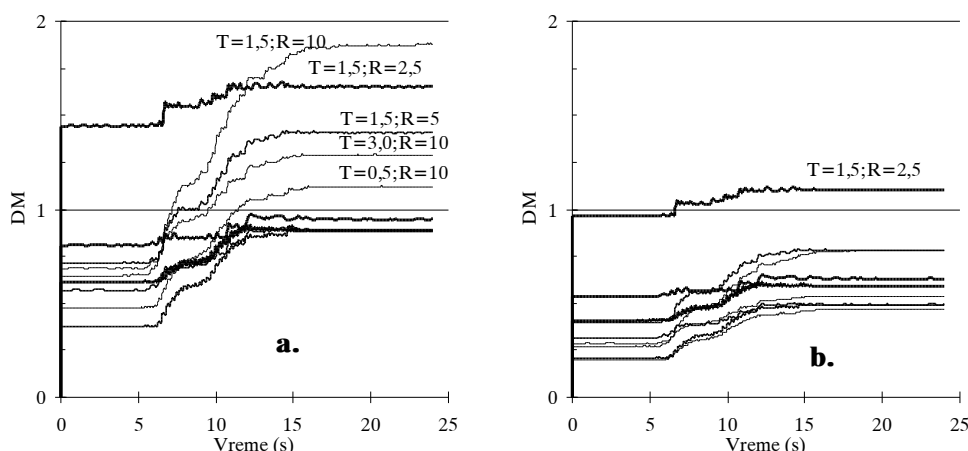
Slika 3.14 Zapis El Centro, indeks oštećenja  $DM$ : a)  $d_u = d_e$ ; b)  $d_u > d_e$

trajanja zemljotresa El Centro sa maksimalnim ubrzanjem tla  $a_g=0,2g$ . Dijagram 3.14.a do-  
bijen je uz pretpostavku da je kapacitet pomeranja  $d_u$  pri monotonom opterećenju upravo jed-  
nak maksimalnom ostvarenom pomeranju  $d_e$  odgovarajuće elastične konstrukcije,  $d_u = d_e$ .

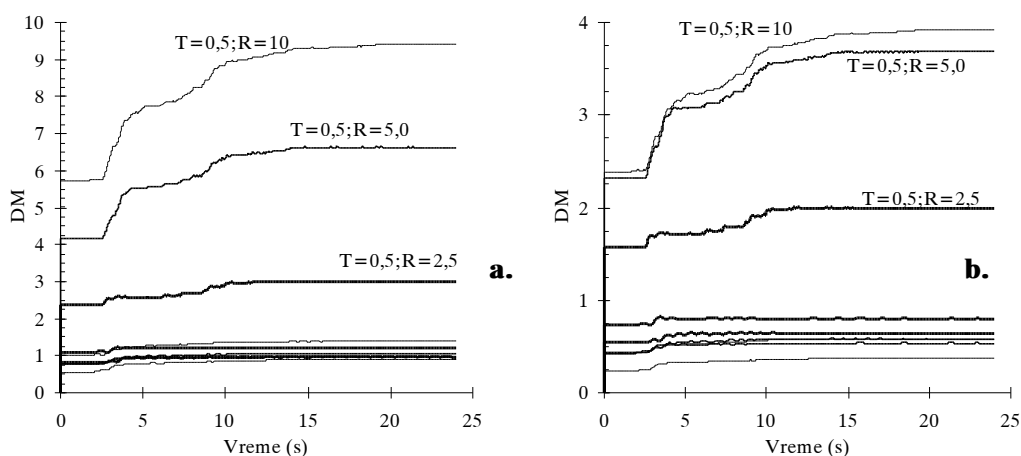
U tom slučaju je  $\mu_u=R$ , slika 3.7. Početna vrednost indeksa,  $DM(t=0)$ , pretstavlja ustvari  
izraz (3.5), da bi potom vrednost indeksa  $DM$  rasla u toku trajanja zemljotresa.

Predviđeni kapacitet pomeranja je nedovoljan ( $DM>1$ ), po pravilu u slučajevima  
većih stepena redukcije opterećenja  $R$ , kada je značajan udeo akumulacije oštećenja, drugi  
član izraza 3.6, slika 3.13. Za dati zapis zemljotresa, kapacitet deformacija konstrukcije  $d_u$  u  
ovom slučaju treba korigovati.

Na slici 3.14.b prikazana je promena indeksa  $DM$  za korigovanu konstrukciju, kod  
koje je za kapacitet pomeranja  $d_u$  pri monotonom opterećenju usvojeno:  $d_u = 1,5d_e$  u  
slučaju  $R=2,5$ ,  $d_u = 1,8d_e$  u slučaju  $R=5$  i  $d_u = 2,4d_e$  u slučaju  $R=10$ . Kao što se vidi,  
vrednosti indeksa  $DM$  praktično su svedene u granice  $DM=1$ , osim za slučaj konstrukcije sa  
periodom  $T=1,5$  za koju je vrednost faktora redukcije opterećenja  $R=10$  u ovom slučaju  
prevelika.



Slika 3.15 Zapis Petrovac, indeks oštećenja  $DM$ : a)  $d_u = d_e$ ; b)  $d_u > d_e$

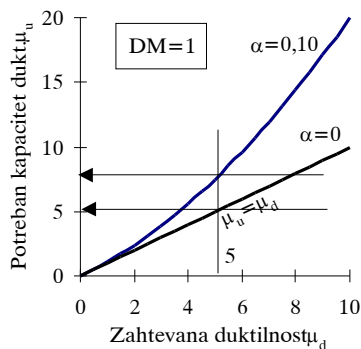


Slika 3.16 Zapis Ulcinj, indeks oštećenja  $DM$ : a)  $d_u = d_e$ ; b)  $d_u > d_e$

Tok akumulacije oštećenja u toku trajanja zemljotresa Petrovac i Ulcinj prikazan je  
na slikama 3.15 odnosno 3.16. Za konstrukciju sa periodom  $T=0,5$  sekundi "lociranu" u  
Ulcinj "nema spasa", ako bi se stvarno ponašala prema primenjenim modelima.

Rezultati izvršenih analiza ukazuju da je u znatnom broju slučajeva potrebno obezbediti nešto veći *potreban kapacitet duktilnosti pomeranja*  $\mu_u$  pri monotonom opterećenju od zahtevane duktilnosti pomeranja  $\mu_d$  pri zemljotresu - tzv. *ekvivalentnu duktilnost*, načelno

$$\mu_u = \frac{\mu_d(1 + \alpha\mu_d)}{DM} \quad (3.7)$$



*Slika 3.17 Potreban kapacitet duktilnosti pomeranja*

gde se za vrednost faktora  $\alpha$  može kvalitativno usvojiti  $\alpha=0,10$ . Za vrednost  $DM=1,0$ , relacija 3.7 prikazana je na slici 3.17, za dve vrednosti parametra  $\alpha$ .

Čemu vrednost  $DM$  u izrazu 3.7? Kvalitativno, smatra se da su u slučaju kada je  $DM < 0,5$ , oštećenja konstrukcije posle zemljotresa popravljiva, da sa porastom vrednosti  $DM$  nivo oštećenja raste, da bi pri vrednosti  $DM=1$  nastupio kolaps konstrukcije [7].

Projektant načelno može da *bira nivo oštećenja* konstrukcije, pri čemu se kriterijum oštećenja može formulisati i po drugim veličinama: obrtanju preseka, relativnom spratnom pomeranju, rotacijama preseka, izduženju armature, širini prslina itd. Koncept je ilustrovan na primeru kritičnog preseka, ali se može generalizovati na element konstrukcije, sprat i konstrukciju u celini.

Razvoj propisa kreće se u pravcu formulisanja koncepta projektovanja na bazi kontrole nekog od bitnih parametara koji opisuju ponašanje i oštećenje objekata - "*performance based design*".