
Dr Nebojša ĐURANOVIĆ

EKSPERIMENTALNA ANALIZA KONSTRUKCIJA

MJERNIM TRAKAMA



**Građevinski fakultet
Univerzitet Crne Gore**



Podgorica, 2008.

Dr Nebojša ĐURANOVIĆ

EKSPERIMENTALNA ANALIZA KONSTRUKCIJA

MJERNIM TRAKAMA



Podgorica, 2008.

Autor

Dr Nebojša Đuranović, dipl.inž.građ.

Vanredni profesor Građevinskog fakulteta Univerziteta Crne Gore, Podgorica

EKSPERIMENTALNA ANALIZA KONSTRUKCIJA MJERNIM TRAKAMA

Izdavač

**Univerzitet Crne Gore
Građevinski fakultet**

Za izdavača

Prof.dr Duško Lučić, dekan

Recenzenti:

Prof.dr Nada Knežević-Vuksanović, dipl.inž.građ.

Prof.dr Radoje Vukotić, dipl.inž.građ.

Prof.dr Ljubomir Vlajić, dipl.inž.građ.

Tehnički urednik:

Goran Pavlović, dipl.ing

Grafička obrada i priprema štampe:

Goran Pavlović, dipl.ing

Štampa:

Štamparija "Artgrafika MONTENEGRO" Podgorica

Tiraž:

300 primjeraka

ISBN 978-86-82727-16-5

CIP - Каталогизација у публикацији
Централна народна библиотеке Црне Горе, Цетиње
624.07

ЂУРАНОВИЋ НЕБОЈША

Eksperimentalna analiza konstrukcija mjernim
trakama / Nebojša Đuranović. - Podgorica :
Univerzitet Crne Gore, Građevinski fakultet, 2008.
(Podgorica : Artgrafika Montenegro) - 182 str. :
graf. prikazi, tabele ; 24 cm

Tiraž 300. - Bibliografija: str. 181-182.

ISBN 978-86-82707-16-5

a) Грађевинске конструкције - Мјерне траке
COBISS.CG-ID 13339664

PREDGOVOR

Kroz svoju dugogodišnju inženjersku i naučnu praksu stekao sam određena saznanja i iskustva iz oblasti eksperimentalne analize konstrukcija. Prepoznajući da u ispitivanju konstrukcija kojim se bave građevinski inženjeri postoji određeni nedostatak informacija i literature iz ove oblasti odlučio sam da ta svoja i tuđa iskustva pretočim u ovaj tekst, sa željom da on podstakne dodatnu žed čitalaca za još dubljim znanjem iz ovog područja nauke.

Primjenu mjernih traka prepoznajem kao područje u kome se eksperimentalna analiza danas najviše razvija i područje gdje postoji najveći potencijal za njen daljnji razvoj. Zbog toga sam toj oblasti u knjizi posvetio i najviše prostora.

Ova knjiga nastala je i u želji da se studentima Građevinskog fakulteta u Podgorici omogući što bolje upoznavanje sa dijelom materije iz predmeta *Ispitivanje konstrukcija*, koji se predaje u VIII semestru konstruktivnog odsjeka na Građevinskom fakultetu u Podgorici. Materija predstavljena ovdje je značajno obimnija od onoga što se predaje tokom redovnih časova iz ovog predmeta. S toga sam mišljenja da ova knjiga od najviše koristi može biti građevinskim inženjerima, eksperimentatorima i naučnicima koji se dublje bave ovom problematikom. Takođe, iz samog naslova knjige je jasno da se ona, u značajnom obimu, može koristiti i za izučavanje i drugih nastavnih predmeta iz ove oblasti, a koji se predaju kako na posdiplomskim studijama Građevinskog fakulteta u Podgorici, tako i na osnovnim i posdiplomskim studijama ostalih Građevinskih fakulteta u okruženju.

Knjigu su recenzovali prof.dr Nada Knežević – Vuksanović, prof.dr Radoje Vukotić i prof.dr Ljubomir Vlajić, pa im se na ovaj način najtoplije zahvaljujem.

Takođe se zahvaljujem Goranu Pavloviću na kompjuterskoj obradi teksta i slike, i Građevinskom fakultetu Univerziteta Crne Gore kao izdavaču knjige.

Na kraju, molim dobronamjernog čitaoca da mi saopšti sve uočene greške, kao i svoje primjedbe i sugestije kako bih ih unio u eventualno naredno izdanje ove knjige.

Podgorica, novembar 2008. godine

Autor

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. RAZVOJ I OSNOVE METODA MJERENJA DEFORMACIJA	3
3. MJERNE TRAKE KOD ISPITIVANJA GRAĐEVINSKIH KONSTRUKCIJA	19
3.1. OSNOVNI PRINCIPI	22
3.1.1. PRINCIP RADA MJERNE TRAKE	22
3.1.2. SASTAVNI DJELOVI I IZRADA MJERNE TRAKE	27
3.1.2.1. ŠTAMPANE TRAKE - TRAKE SA FOLIJOM	29
3.1.2.2. POLUPROVODNIČKE MJERNE TRAKE	31
3.2. MJERENJA PROMJENE OTPORA - <i>WHEATSTONE</i> -OV MOST	33
3.3. TAČNOST MJERENJA	37
3.3.1. UTICAJ TEMPERATURE NA RAD MJERNIH TRAKA	37
3.3.1.1. ODSTRANJIVANJE UTICAJA TEMPERATURE IZ REZULTATA MJERENJA	42
<i>Primjena temperaturno samokompezujućih mjernih traka</i>	43
<i>Primjena kompenzacionih mjernih traka</i>	44
3.3.2. UTICAJ DUŽINE STRUJNIH KABLOVA NA RAD MJERNIH TRAKA	46
3.3.2.1. MJERNI SISTEM SA TRI STRUJNA KABLA	50
3.3.2.2. ZAVRŠNE NAPOMENE U VEZI ELIMINACIJE UTICAJA DUGAČKIH KABLOVA NA REZULTATE MJERENJA	52
3.3.3. UTICAJ VELIČINE MJERNE TRAKE NA REZULTATE MJERENJA I IZBOR VELIČINE MJERNE TRAKE (BAZE MJERENJA)	53
3.3.4. O KOEFICIJENTU OSJETLJIVOSTI MJERNE TRAKE <i>K</i> , LINEARNOSTI I HISTEREZISNOM PONAŠANJU ODGOVORA I NULI MJERNOG SISTEMA	55
3.3.5. O ODGOVORU MJERNE TRAKE NA DINAMIČKA OPTEREĆENJA	57
3.3.6. O PONAŠANJU MJERNE TRAKE NA UČESTANA I CIKLIČNA OPTEREĆENJA - IZDRŽLJIVOST, TJ. ZAMOR MJERNE TRAKE	58

3.3.7. O DIJAPAZONU MJERLJIVIH DILATACIJA	59
3.3.8. O MJERENJIMA POD PRITISKOM	60
3.3.9. UTICAJ JAČINE STRUJE U MJERNOM MOSTU NA RAD MJERNIH TRAKA	60
3.3.10. O ZNAČAJU JEDNOSTAVNOSTI POSTAVLJANJA NA UPOTREBU MJERNIH TRAKA	61
3.3.11. O CIJENI KOŠTANJA ISPITIVANJA MJERNIM TRAKAMA	61
3.4. UGRAĐIVANJE MJERNIH TRAKA	63
3.4.1. POSTUPAK PRI POSTAVLJANJU MJERNE TRAKE	64
3.4.2. SPECIFIČNOSTI POSTAVLJANJA MJERNIH TRAKA NA BETON I ARMATURU	72
3.4.3. ZAŠTITA MJERNOG SISTEMA	73
3.4.3.1. ZAŠTITA OD UTICAJA VLAGE	74
3.4.3.2. ZAŠTITA OD MEHANIČKIH OŠTEĆENJA	77
3.4.4. PROVJERA ISPRAVNOSTI MJERNOG SISTEMA	77
3.4.5. USLOVI ZA OTPOČINJANJE I OBAVLJANJE MJERENJA	79
3.5. KORIŠĆENJE POJEDINAČNO POSTAVLJENIH MJERNIH TRAKA	80
3.5.1. MJERNA ŠEMA 1 - ČETVRTINSKI MOST	80
3.5.2. MJERNA ŠEMA 2 - MJERNI MOST ZA PRIMJENU POLUPROVODNIČKIH MJERNIH TRAKA	82
3.5.3. MJERNA ŠEMA 3 - POLOVINSKI MOST SA MJERNIM TRAKAMA U SUSJEDNIM GRANAMA - ZA ELIMINACIJU UTICAJA TEMPERATURE	83
3.5.4. MJERNA ŠEMA 4 - POLOVINSKI MOST SA MJERNIM TRAKAMA U NASPRAMNIM GRANAMA MOSTA - ZA POJAČAVANJE IZLAZNIH STRUJNIH NAPONA	87
3.5.5. MJERNA ŠEMA 5 - POLOVINSKI MOST ZA ELIMINISANJE DILATACIJA OD AKSIJALNIH SILA	88
3.5.6. MJERNA ŠEMA 6 - POLOVINSKI MOST ZA ELIMISANJE DILATACIJA OD SAVIJANJA	89
3.5.7. MJERNA ŠEMA 7 - PUNI <i>WHEATSTONE</i> -OV MOST	89
3.6. ANALIZA NAPONA I DEFORMACIJA SISTEMIMA MJERNIH TRAKA - ROZETAMA	92
3.6.1. ANALIZA RADA ROZETA	95
3.6.1.1. PRAVOUGAONA ROZETA	98
3.6.1.2. DELTA ROZETA	99
3.6.2. O ODREĐIVANJU SMIČUĆIH DILATACIJA (KLIZANJA) KOD RAVNOG STANJA NAPONA	100
3.6.2.1. ODREĐIVANJE KLIZANJA IZ IZMJERENIH DILATACIJA DVOELEMENTSKE ROZETE	102
3.6.2.2. MAKSIMALNE SMIČUĆE DEFORMACIJE (KLIZANJA)	105

3.6.2.3. KOREKCIJA VELIČINA SRAČUNATIH DEFORMACIJA KLIZANJA USLED POPREČNE OSJETLJIVOSTI MJERNIH TRAKA	107
3.6.2.4. PODRUČJE PRIMJENE MJERNIH TRAKA ZA SMICANJE	107
3.6.3. KONAČNI IZRAZI ZA NAPONE I DEFORMACIJE	108
3.6.4. GREŠKA PRI MJERENJIMA USLIJED DILATACIJA U POPREČNOM PRAVCU.	112
3.6.4.1. BAŽDARENJE MJERNIH TRAKA I FAKTOR POPREČNE OSJETLJIVOSTI.	114
<i>Način korekcije greške koja je posljedica poprečne osjetljivosti kod korišćenja jedne mjerne trake</i>	116
3.6.4.2. MJERAČI NAPONA - NAPONSKE MJERNE TRAKE	118
3.6.5. GREŠKA MJERENJA USLIJED POSTAVLJANJA TRAKE POD LOŠIM UGLOM	123
3.6.5.1. GREŠKA AKO SE POSTAVLJA ROZETA OD DVIJE MJERNE TRAKE	126
3.6.6. NAPOMENA O ANALIZI PROSTORNOG STANJA NAPONA I DEFORMACIJA.	129
3.6.7. REKAPITULACIJA NAJČEŠĆIH PROBLEMA, OGRANIČENJA I GREŠAKA KOD UPOTREBE ROZETA MJERNIH TRAKA	130
3.7. MJERNA TRAKA KAO SASTAVNI DIO DRUGIH MJERNIH SREDSTAVA - PRETVARAČA	133
3.7.1. PRETVARAČI ZA MJERENJE SILE	134
3.7.1.1. MJERENJA SILE KORIŠĆENJEM AKSIJALNO OPTEREĆENE OPRUGE	135
3.7.1.2. MJERENJA SILE KOJA PROUZROKUJE SAVIJANJE MJERNOG TIJELA	138
3.7.1.3. MJERENJA SILE SMICANJEM MJERNOG TIJELA	140
3.7.2. PRETVARAČ ZA MJERENJE TORZIJE	140
3.7.3. PRETVARAČ ZA MERENJE UBRZANJA - AKCELEROMETAR.	142
3.7.4. KONSTRUKCIJA "UMETNUTOG" MJERAČA RASTOJANJA - ZEVOMJERA	143
3.7.5. MEMBRANSKA TRAKA - MJERAČ PRITISKA	144
3.8. SPECIJALNE MJERNE TRAKE	146
3.8.1. MJERNI LANCI	146
3.8.2. TRAKA ZA REGISTROVANJE POJAVE PRSLINA	147
3.8.3. TRAKE ZA MJERENJE RAZVOJA (NAPREDOVANJA, PROPAGACIJE) PRSLINA	147
3.8.4. ZAVARLJIVE MJERNE TRAKE I MJERNE TRAKE ZA UGRAĐIVANJE U BETONU	148
3.9. OSTALE NAMJENE MJERNIH TRAKA ZA ISPITIVANJE GRAĐEVINSKIH ELEMENATA I KONSTRUKCIJA.	150
3.9.1. DUGOTRAJNA ISPITIVANJA KONSTRUKCIJA KORIŠĆENJEM MJERNIH TRAKA.	150
3.9.2. ISPITIVANJE POSTOJEĆEG NAPONSKO - DEFORMACIONOG STANJA KONSTRUKCIJE KORIŠĆENJEM METODA ODREĐIVANJA ZAOSTALIH NAPONA	152

3.9.2.1. METODA ODREĐIVANJA ZAOSTALIH NAPONA FORMIRANJEM OTVORA	154
<i>Osnovni principi metode.</i>	155
<i>Analiza naponskog stanja za slučaj novoformiranog otvora koji izlazi na obje strane ispitivanog elementa</i>	156
<i>Analiza naponskog stanja za slučaj novoformiranog otvora koji ne izlazi na drugu stranu ispitivanog elementa (slučaj slijepog otvora)</i>	165
<i>Sprovođenje metode formiranja otvora i kvalitet dobijenih rezultata</i>	167
<i>Određivanje koeficijenata " $\bar{A}$ " i " $\bar{B}$ " analitički i baždarenjem.</i>	168
3.9.2.2. PRIMJENE TEHNIKE ZA ODREĐIVANJE POSTOJEĆEG STANJA NAPONA KOD BETONSKIH I ARMIRANO BETONSKIH KONSTRUKCIJA	174
<i>Metoda prošlicavanja</i>	174
<i>Aplikacija metode formiranja otvora kod betonskih konstrukcija</i>	175
<i>Specifičnosti kod metalnih konstrukcija, armature i kablova za prethodno naprezanje</i>	179
LITERATURA	181