

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

ГРАЂЕВИНСКИ ФАКУЛТЕТ

Бојан Д. Миловановић

**ХИДРОДИНАМИЧКИ УТИЦАЈИ НА
ЕВАКУАЦИОНЕ ОБЈЕКТЕ
ХИДРОТЕХНИЧКИХ ГРАЂЕВИНА**

докторска дисертација

Београд, 2018

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Bojan D. Milovanović

**HYDRODYNAMIC LOADS ON THE
EVACUATION FACILITIES OF
HYDRAULIC STRUCTURES**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2018

Ментор: Проф. др Владан Кузмановић,
Универзитет у Београду - Грађевински факултет

Чланови комисије: Проф. др Љубодраг Савић,
Универзитет у Београду - Грађевински факултет
Проф. др Никола Младеновић,
Универзитет у Београду - Машински факултет

Датум одбране докторске дисертације: _____

ЗАХВАЛНОСТ

Захвалност за израду ове докторске дисертације дугујем ментору Проф. др Владану Кузмановићу, као и осталим члановима комисије Проф. др Љубодрагу Савићу и Проф. др Николи Младеновићу, јер су својим добронамерним и сврсисходним саветима допринели побољшању квалитета дисертације. Захвалност дугујем колегама са Института за хидротехнику и водно еколошко инжењерство, који су обезбедили финансије за физички модел, као и колегама из института Јарослав Черни који су ставили на располагање неопходну мерну технику.

Захваљујем се и својој породици и пријатељима зато што су смогли снаге да ме подносе током израде ове дисертације.

ХИДРОДИНАМИЧКИ УТИЦАЈИ НА ЕВАКУАЦИОНЕ ОБЈЕКТЕ ХИДРОТЕХНИЧКИХ ГРАЂЕВИНА

Резиме: У оквиру докторске дисертације су анализирани хидродинамички утицаји на зидове и дно умирујућег базена иза степенастог брзотока гравитационих бетонских брана. На физичком моделу је испитан утицај геометријских карактеристика степенастог брзотока (степен сужења и висина степеника) и параметара течења (протока и дубине доње воде) на хидродинамичка оптерећења у умирујућем базену. На основу анализе резултата моделских испитивања, изведене су емпиријске једначине, којима се, у зависности од поменутих параметара, описују хидродинамички притисци на зидове и дно умирујућег базена. Провера предложених емпиријских израза извршена је на резултатима хидрауличких моделских испитивања степенастог пелива на брани „Бузина“. Резултати испитивања на физичком моделу затим су коришћени за одређивање емпиријских израза за добијање меродавних хидродинамичких утицаја на зидове и дно умирујућег базена. На основу добијених резултата предложене су мере за осигурање умирујућег базена од појаве потпритисака, односно од штетних утицаја кавитационе ерозије услед хидродинамичких утицаја. Резултати овог истраживања се могу успешно применити при пројектовању умирујућих базена, пре свега у нижим фазама пројектовања.

Кључне речи:

степенести брзоток, степен сужења, умирујући базен, хидраулички скок, хидродинамичко оптерећење, пулзација притиска.

Научна област: Грађевинарство

Ужа научна област: Хидротехничке грађевине и објекти

УДК број: 626/627:532.5(043.3)

HYDRODYNAMIC LOADS ON APPURTENANT HYDRAULIC STRUCTURES

Abstract: Hydrodynamic loads on the walls and the bottom of the stilling basin downstream of the stepped chute of a concrete gravity dam have been analysed. A physical scale model was constructed to investigate the influence of the stepped chute geometry (the constriction angle and the step height) and flow characteristics (discharge, expressed via the Froude number at the constriction, and the downstream flow depth) on the hydrodynamic loads in the stilling basin. Based on the scale model results, new empirical expressions for the assessment of hydraulic loads on the walls and the bottom of the stilling basin are proposed. In addition, the risk of flow induced vibrations and cavitation were estimated. The obtained expressions were tested and validated using the results obtained on the physical scale model of the Buzina dam stepped spillway. The obtained results can be used during the early design stages for the assessment of hydrodynamic loads in stilling basins.

Key words: stepped spillway, constriction angle, stilling basin, hydraulic jump, hydrodynamic load, pressure fluctuations.

Scientific field: Civil engineering

Specific scientific field: Hydraulic structure and facilities

UDK number: 626/627:532.5(043.3)

САДРЖАЈ

1	УВОД.....	1
2	ОПИС ПРОБЛЕМА.....	4
3	ПРЕТХОДНА ИСТРАЖИВАЊА.....	9
4	МОДЕЛСКА ИСПИТИВАЊА.....	20
4.1	Опис модела.....	20
4.1.1	Опис модела у лабораторији на Грађевинском факултету....	20
4.1.2	Опис модела бране „Бузина“.....	27
4.2	Опис мерења на моделу.....	34
4.2.1	Мерење протока.....	34
4.2.2	Мерење нивоа воде у резервоару.....	36
4.2.3	Мерење дубине воде у умирујућем базену.....	37
4.2.4	Мерење динамичких притисака.....	37
4.2.5	Мерење брзине на почетку умирујућег базена.....	38
4.3	Обим моделских испитивања.....	39
4.4	Димензиона анализа.....	39
4.5	План узорковања на моделу.....	43
4.5.1	Величине које се узоркују	43
4.5.2	Трајање и фреквенца узорковања	44
4.5.3	Статистичка расподела узоркованих података	47
4.6	Обрада података добијених мерењем.....	46
4.7	Резултати мерења на моделу ГФ-0М	53
4.6	Резултати мерења на моделу ГФ-0В	67
4.6	Резултати мерења на моделу ГФ-1М.....	75
4.7	Резултати мерења на моделу ГФ-1В.....	87
4.8	Резултати мерења на моделу ГФ-2М.....	90
4.9	Резултати мерења на моделу ГФ-2В.....	102

4.10	Резултати мерења на моделу ГФ-3М.....	111
4.11	Резултати мерења на моделу ГФ-3В.....	114
4.12	Резултати мерења на моделу „Бузина“.....	116
5	РЕГРЕСИОНА АНАЛИЗА.....	121
5.1	Циљ регресионе анализе.....	120
5.2	Вертикална сила од средњих притисака на половини дна базена.....	124
5.3	Вертикална сила од пулзација на половини дна базена.....	125
5.4	Вертикална сила од средњих притисака на узводној четвртини дна базена.....	127
5.5	Вертикална сила од пулзација на узводној четвртини дна.....	129
5.6	Вертикална сила од средњих притисака на низводној четвртини дна базена.....	130
5.7	Вертикална сила од од пулзација на низводној четвртини дна базена.....	132
5.8	Максимална хоризонтална сила од средњих притисака у уклештењу зида умирујућег базена.....	133
5.9	Максимални моменат од средњих притисака у уклештењу умирујућег базена.....	134
5.10	Максимална хоризонтална сила од пулзација у уклештењу умирујућег базена.....	136
5.11	Максимални моменат од пулзација у уклештењу зида умирујућег базена.....	137
5.12	Поређење резултата са модела „Бузина“ и моделу ГФ	138
6	ЗАКЉУЧЦИ	142
7	ЛИТЕРАТУРА.....	145
8	БИОГРАФИЈА АУТОРА.....	147

СПИСАК СЛИКА

Слика 2.1	Најчешће диспозиције евакуационих органа.....	4
Слика 2.2	Дијаграм пулзација притисака у умирујућем базену.....	5
Слика 2.3	Хидраулички скок у умирујућем базену.....	6
Слика 2.4	Оштећења од динамичког узгона на брани Тарбела у Пакистану.....	7
Слика 2.5	Кавитација у умирујућем базену.....	8
Слика 2.6	Кавитациона ерозија.....	8
Слика 3.1	Диспозиција опитне инсталације за непотопљен хидраулички скок.....	12
Слика 3.2	Дијаграм коефицијената пулзационих притисака.....	13
Слика 3.3	Дијаграм подужних и попречних коефицијената корелације.....	13
Слика 3.4	Диспозиција опитне инсталације за потопљен хидраулички скок.....	14
Слика 3.5	Дијаграми пулзационих притисака у зависности од протока.....	14
Слика 3.6	Дијаграм максималних пулзационих притисака у зависности од протока.....	15
Слика 3.7	Дијаграм односа максималних пулзација и зауоставног притиска у зависности од протока.....	15
Слика 3.8	Дијаграми пулзационих притисака у зависности од потапања хидрауличког скока.....	16
Слика 3.9	Расподела пулзационих притисака по Абдулу Кадеру и Ерлангу.....	17
Слика 3.10	Расподела пулзационих притисака по Акбарију.....	17

Слика 4.1	Схематски приказ инсталације за моделска испитивања...	21
Слика 4.2	Подужни пресек кроз мерну инсталацију.....	22
Слика 4.3	Основа мерне инсталације.....	23
Слика 4.4	Дрвена решетка за умирење нивоа воде у резервоару.....	24
Слика 4.5	Прелив практичног профила на ГФ моделу.....	25
Слика 4.6	Степенести брзоток на ГФ моделу.....	25
Слика 4.7	Умирујући базен на ГФ моделу.....	26
Слика 4.8	Мере за контролу низводног граничног услова.....	26
Слика 4.9	Метални рам за постављање мерне опреме.....	27
Слика 4.10	Диспозиција бране „Бузина“	28
Слика 4.11	Хидраулички модел бране „Бузина“	30
Слика 4.12	Основа модела бране „Бузина“	30
Слика 4.13	Попречни пресек модела бране „Бузина“	31
Слика 4.14	Схематски приказ инсталације за модел бране „Бузина“	32
Слика 4.15	Мерење нивоа воде у резервоару са Томсоновим преливом.....	34
Слика 4.16	Ултразвучни мерач протицаја „Dynasonics TFXL“.....	34
Слика 4.17	Мерни лењири и пиезаметарска цев на резервоару мерне инсталације.....	35
Слика 4.18	Лењири за мерење дубине воде умирујућем базену.....	36
Слика 4.19	Сонда за мерење динамичких притисака.....	36
Слика 4.20	Аквизициони модул „НВМ Quantumx“	37
Слика 4.21	Трострука сонда за мерење електропроводности.....	37
Слика 4.22	$\delta F_{cp}(f)$, са параметром Δt	45
Слика 4.23	$\delta F_{cp}(\Delta t)$, са параметром f	45
Слика 4.24	$\delta F_{\sigma}(f)$, са параметром Δt	46

Слика 4.25	$\delta F_{\sigma}(\Delta t)$, са параметром f	46
Слика 4.26	Релативна одступања силе F_{σ} у "простору мерења"	47
Слика 4.27	Релативна одступања силе F_{σ} у "простору мерења"	47
Слика 4.28	Слагање расподеле података са нормалном	48
Слика 4.29	Слагање расподеле измерених вредности са нормалном расподелом у "простору мерења"	48
Слика 4.30	Распоред мерних сонди и лењира на моделу ГФ-0М	54
Слика 4.31	Пулзације на дну базена за експеримент 0MQ60h19	55
Слика 4.32	Линија нивоа за експеримент 0MQ40h15	56
Слика 4.33	Средњи притисци по подужним пресецима за експеримент 0MQ40h15.....	56
Слика 4.34	Скретни притисци, $p_{ск,д}$, по подужним пресецима за експеримент 0MQ40h15	57
Слика 4.35	Средњи притисци за експерименте 0MQ60 при различитим потопљеностима хидрауличког скока	58
Слика 4.36	Промена утицаја у базену, при варијацији потопљености хидрауличког скока у експериментима 0MQ60	59
Слика 4.37	Промена утицаја у базену, при варијацији Фрудовог броја и сличној потопљености хидрауличког скока на моделу ГФ-0М	59
Слика 4.38	Слагање сила од пулзација (F') добијених директном методом, са силама (F'^*) добијеним поступком датим у литератури [2]	60
Слика 4.39	Слагање расподеле података са мерних сонди и нормалне (Гаусове) расподеле за експеримент 0MQ40h17	60
Слика 4.40	Промена средњих притисака на зид базена, при варијацији Фрудовог броја и истој потопљености хидрауличког скока.....	61
Слика 4.41	Промена пулзација притиска на зид базена, при варијацији Фрудовог броја и истој потопљености хидрауличког скока ...	61

Слика 4.42	Промена хоризонталне силе у уклештењу дуж зида базена	62
Слика 4.43	Промена момента у уклештењу дуж зида базена	62
Слика 4.44	Промена максималне хоризонталне силе у уклештењу зида услед средњих притисака, у зависности од потопљености скока и Фрудовог броја на моделу ГФ-0М	63
Слика 4.45	Промена максималног момента у уклештењу зида базена услед средњих притисака, у зависности од потопљености скока и Фрудовог броја на моделу ГФ-0М.....	63
Слика 4.46	Промена максималне хоризонталне силе у уклештењу зида базена услед пулзација, у зависности од потопљености скока и Фрудовог броја на моделу ГФ-0М	64
Слика 4.47	Промена максималног момента у уклештењу зида базена услед пулзација, у зависности од потопљености скока и Фрудовог броја на моделу ГФ-0М	64
Слика 4.48	Промена коефицијента пригушења пулзационе силе у зависности од Фрудовог броја, при истој потопљености хидрауличког скока на моделу ГФ-0М.....	65
Слика 4.49	Промена коефицијента пригушења пулзационе силе у зависности од потопљености хидрауличког скока при истом Фрудовом броју за модел ГФ-0М.....	66
Слика 4.50	Доминантне фреквенце утицаја на узводни део базена у експерименту: 0MQ40h14 ($\Omega_{и} = 0,98$)	66
Слика 4.51	Скретни притисци у дну умирујућег базена за експеримент а) 0VQ40h17 и б) 0VQ40h17.....	67
Слика 4.52	Средњи притисци на дно умирујућег базена за експеримент 0VQ40h14	68
Слика 4.53	Линија нивоа у базену за експеримент 0VQ40h14.....	68
Слика 4.54	Расподела средњих притисака у попречним пресецима умирујућег базена при $Fr_1 = 44,5$ и различитим потопљеностима скока.....	69

Слика 4.55	Расподела пулзационих притисака у попречним пресецима умирујућег базена при $Fr_1 = 44,5$ и различитим потоњностима скока.....	69
Слика 4.56	Промена утицаја у базену, при варијацији потоњности хидрауличког скока за експеримент 0VQ60.....	70
Слика 4.57	Промена утицаја у базену, при варијацији Фрудовог броја и сличној потоњности хидрауличког скока у базену за модел ГФ-0V.....	70
Слика 4.58	Слагање сила од пулзација (F') добијених различитим методама, прорачуна на моделу ГФ-0V.....	71
Слика 4.59	Слагање расподеле података са мерних сонди и нормалне (Гаусове) расподеле за експеримент 0VQ40h17.....	71
Слика 4.60	Расподела средњих притисака на зид базена, а) при експерименту 0MQ40h17 и б) при експерименту 0VQ40h17..	72
Слика 4.61	Расподела пулзација на зид базена, а) при експерименту 0MQ40h17 и б) при експерименту 0VQ40h17.....	72
Слика 4.62	Промена максималне хоризонталне силе у уклештењу зида услед средњих притисака, у зависности од потоњности скока и Фрудовог броја на моделу ГФ-0V.....	73
Слика 4.63	Промена максималног момента у уклештењу зида услед средњих притисака, у зависности од потоњности скока и Фрудовог броја на моделу ГФ-0V.....	73
Слика 4.64	Промена максималне хоризонталне силе у уклештењу зида услед пулзација у зависности од потоњности скока и Фрудовог броја на моделу ГФ-0V.....	74
Слика 4.65	Промена максималног момента у уклештењу зида услед пулзација у зависности од потоњности скока и Фрудовог броја на моделу ГФ-0V.....	74
Слика 4.66	Промена коефицијента пригушења пулзационе силе на моделу ГФ-0V у зависности од Фрудовог броја, при истој потоњности хидрауличког скока.....	75

Слика 4.67	Промена коефицијента пригушења пулзационе силе на моделу ГФ-0V у зависности од потопљености хидрауличког скока при истом Фрудовом броју.....	75
Слика 4.68	Распоред мерних сонди и лењира на моделу ГФ-1M а) дно, б) зид.....	76
Слика 4.69	Средњи притисци за експеримент 1MQ40h15 ($Fr_1 = 34,04$) а) дно, б) зид.....	77
Слика 4.70	Средњи притисци за експерименте 1MQ60 ($Fr_1 = 29,332$) при различитим потопљеностима хидрауличког скока.....	78
Слика 4.71	Пулзације за експеримент 1MQ20h11 ($Fr_1 = 50,67$) а) дно, б) зид.....	78
Слика 4.72	Пулзације на дно за експерименте а) 1MQ40h14 ($Fr_1 = 32,88$) и б) 1MQ60h19 ($Fr_1 = 29,33$).....	79
Слика 4.73	Подужна расподела пулзације на дно базена за експеримент 1MQ60h20, $Fr_1 = 29,33$ и $\Omega_{и} = 1,044$	80
Слика 4.74	Пулзације на зидове умирујућег базена за различите вредности Фрудовог броја а) експеримент 1MQ40h14, $Fr_{1,a} = 32,88$, $\Omega_{и,a} = 1,15$ и б) експеримент 1MQ60h22, $Fr_{1,b} = 29,33$ и $\Omega_{и,b} = 1,08$	80
Слика 4.75	Промена утицаја у базену, при варијацији потопљености хидрауличког скока за експерименте 1MQ60.....	81
Слика 4.76	Промена утицаја у базену, при варијацији Фрудовог броја и при константној потопљености хидрауличког скока у базену за модел ГФ-1M.....	81
Слика 4.77	Слагање сила од пулзација (F') добијених директном методом, са силама (F'^*) добијеним поступком из [2], на моделу ГФ-1M.....	82
Слика 4.78	Промена максималне хоризонталне силе у уклештењу зида услед средњих притисака, у зависности од потопљености скока и Фрудовог броја на моделу ГФ-1M.....	82

Слика 4.79	Промена максималног момента у уклештењу зида услед средњих притисака, у зависности од потопљености скока и Фрудовог броја на моделу ГФ-1М.....	83
Слика 4.80	Промена максималне хоризонталне силе у уклештењу зида услед пулзација у зависности од потопљености скока и Фрудовог броја на моделу ГФ-1М.....	83
Слика 4.81	Промена максималног момента у уклештењу зида услед пулзација у зависности од потопљености скока и Фрудовог броја на моделу ГФ-1М.....	84
Слика 4.82	Промена коефицијента пригушења пулзационе силе у зависности од Фрудовог броја, при истој потопљености хидрауличког скока.....	85
Слика 4.83	Промена коефицијента пригушења пулзационе силе на моделу ГФ-1М у зависности од потопљености хидрауличког скока при истом Фрудовом броју на моделу ГФ-1М.....	85
Слика 4.84	Доминантне фреквенце утицаја на узводни део базена у експерименту: 1MQ60h18 ($\Omega_{и} = 0,954$).....	85
Слика 4.85	Средњи притисци у дну умирујућег базена за $Fr_1 = 34,97$ и при различитим вредностима потопљености хидрауличког скока.....	87
Слика 4.86	Пулзације на дно умирујућег базена на моделу ГФ-1V за приближно исту потопљеност скока $\Omega_{и} = 1$ и различите вредности Фрудовог броја у суженом пресеку.....	87
Слика 4.87	Промена утицаја у базену, при варијацији потопљености хидрауличког скока за експерименте 1VQ60.....	88
Слика 4.88	Промена утицаја у базену, при варијацији Фрудовог броја и истој потопљености хидрауличког скока у базену за модел ГФ-1V.....	88
Слика 4.89	Слагање сила од пулзација (F') добијених различитим методама, прорачуна на моделу ГФ-1V.....	89

Слика 4.90	Промена максималне хоризонталне силе у уклештењу зида услед средњих притисака, у зависности од потопљености скока и Фрудовог броја на моделу ГФ-1V.....	89
Слика 4.91	Промена максималног момента у уклештењу зида услед средњих притисака, зависно од потопљености скока и Фрудовог броја на моделу ГФ-1V.....	90
Слика 4.92	Промена максималне хоризонталне силе у уклештењу зида услед пулзација у зависности од потопљености скока и Фрудовог броја на моделу ГФ-1V.....	90
Слика 4.93	Промена максималног момента у уклештењу зида услед пулзација у зависности од потопљености скока и Фрудовог броја на моделу ГФ-1V.....	91
Слика 4.94	Промена коефицијента пригушења пулзационе силе на моделу ГФ-1V у зависности од Фрудовог броја, при истој потопљености хидрауличког скока.....	91
Слика 4.95	Промена коефицијента пригушења пулзационе силе на моделу ГФ-1V у зависности од потопљености хидрауличког скока при истом Фрудовом броју.....	92
Слика 4.96	Распоред мерних сонди и лењира на моделу ГФ-2M а) дно, б) зид.....	93
Слика 4.97	Средњи притисци у дну базена за експерименте а) 2MQ20h12 и б) 2MQ40h18.....	94
Слика 4.98	Линија нивоа за експерименте а) 2MQ20h12 и б) а) 2MQ40h18.....	95
Слика 4.99	Средњи притисци на дно при $Fr_1 = 20,82$ и различитим потопљеностима хидрауличког скока: а) $\Omega_{и} = 0,97$ б) $\Omega_{и} = 1,04$ в) $\Omega_{и} = 1,08$	95
Слика 4.100	Расподела средњих притисака на дно при $Fr_1 = 20,82$ и различитим потопљеностима хидрауличког скока: а) $\Omega_{и} = 1,04$ б) $\Omega_{и} = 1,08$	96
Слика 4.101	Расподела пулзација на дно базена при сличним потопљеностима хидрауличког скока и различитим	

Фрудовим бројевима у суженом пресеку а) $Fr_1 = 40,82$ б) $Fr_1 = 26,61$ и в) $Fr_1 = 20,82$	96
Слика 4.102 Промена утицаја у базену, при варијацији потопљености хидрауличког скока за експерименте 2MQ60	97
Слика 4.103 Промена утицаја у базену, при варијацији Фрудовог броја при истој потопљености хидрауличког скока у базену на моделу ГФ-2М.....	97
Слика 4.104 Слагање сила од пулзација (F') добијених директном методом, са силама (F^*) добијеним под претпоставком о нормалној расподели на моделу ГФ-2М	98
Слика 4.105 Промена максималне хоризонталне силе у уклештењу зида услед средњих притисака, у зависности од потопљености скока и Фрудовог броја на моделу ГФ-2М.....	98
Слика 4.106 Промена максималног момента у уклештењу зида услед средњих притисака, зависно од потопљености скока и Фрудовог броја на моделу ГФ-2М.....	99
Слика 4.107 Промена максималне хоризонталне силе у уклештењу зида услед пулзација у зависности од потопљености скока и Фрудовог броја на моделу ГФ-2М.....	99
Слика 4.108 Промена максималног момента у уклештењу зида услед пулзација у зависности од потопљености скока и Фрудовог броја на моделу ГФ-2М.....	100
Слика 4.109 Промена коефицијента пригушења пулзационе силе на моделу ГФ-2М у зависности од Фрудовог броја, при истој потопљености хидрауличког скока.....	101
Слика 4.110 Промена коефицијента пригушења пулзационе силе на моделу ГФ-2М у зависности од потопљености хидрауличког скока при истом Фрудовом броју.....	101
Слика 4.111 Доминантне фреквенце утицаја на узводни део плоче базена у експерименту: 2MQ40h17 ($\Omega_{II} = 0,926$).....	101
Слика 4.112 Средњи притисци у дну умирујућег базена за експерименте а) 2VQ20h12 и б) 2VQ20h13.....	103

Слика 4.113 Средњи притисци у подужним пресецима базена за експерименте а) 2VQ20h12 и б) 2VQ20h13.....	103
Слика 4.114 Средњи притисци у дну умирујућег базена за експерименте а) 2VQ60h22 и б) 2VQ60h24.....	104
Слика 4.115 Средњи притисци у подужним пресецима базена за експерименте а) 2VQ60h22 и б) 2VQ60h24.....	104
Слика 4.116 Пулзације у дну умирујућег базена за експерименте а) 2VQ20h12 и б) 2VQ20h13	105
Слика 4.117 Пулзације у дну умирујућег базена за експерименте а) 2VQ60h22 и б) 2VQ60h24.....	106
Слика 4.118 Расподела пулзација у попречним пресецима умирујућег базена за експерименте а) 2VQ60h22 и б) 2VQ60h24.....	106
Слика 4.119 Промена утицаја у базену, при варијацији потопљености хидрауличког скока за експерименте 2VQ60.....	107
Слика 4.120 Промена утицаја у базену, при варијацији Фрудовог броја и истој потопљености хидрауличког скока у базену на моделу ГФ-2V.....	107
Слика 4.121 Слагање сила од пулзација (F') добијених различитим методама, прорачуна на моделу ГФ-2V.....	108
Слика 4.122 Промена максималне хоризонталне силе у уклештењу зида услед средњих притисака, у зависности од потопљености скока и Фрудовог броја на моделу ГФ-2V.....	108
Слика 4.123 Промена максималног момента у уклештењу зида услед средњих притисака, зависно од потопљености скока и Фрудовог броја на моделу ГФ-2V.....	109
Слика 4.124 Промена максималне хоризонталне силе у уклештењу зида услед пулзација у зависности од потопљености скока и Фрудовог броја на моделу ГФ-2V.....	109
Слика 4.125 Промена максималног момента у уклештењу зида услед пулзација у зависности од потопљености скока и Фрудовог броја на моделу ГФ-2V.....	110

Слика 4.126	Промена коефицијента пригушења пулзационе силе на моделу ГФ-2V у зависности од Фрудовога броја, при истој потошњености хидрауличког скока.....	111
Слика 4.127	Промена коефицијента пригушења пулзационе силе на моделу ГФ-2V у зависности од потошњености хидрауличког скока при истом Фрудовом броју.....	111
Слика 4.128	Распоред мерних сонди и лењира на моделу ГФ-3M а) дно, б) зид.....	112
Слика 4.129	Средњи притисци на дну базена за експерименте а) 3MQ40h21 и б) 3MQ40h23.....	113
Слика 4.130	Пулзације на дну базена за експерименте а) 3MQ40h21 и б) 3MQ40h23.....	113
Слика 4.131	Распоред мерних сонди и лењира на моделу ГФ-3V а) дно, б) зид.....	114
Слика 4.132	Средњи притисци на дну базена за експерименте а) 3MV20h14 и б) 3MV20h16.....	115
Слика 4.133	Пулзације на дну базена за експерименте а) 3MV20h14 и б) 3MV20h16.....	116
Слика 4.134	Распоред мерних сонди на хидрауличком моделу бране „Бузина“	117
Слика 4.135	Промена средњих притисака и пулзација на мерном месту непосредно иза брзотока (а) и на излазу из слапишта (б).....	117
Слика 4.136	Промена средњих притисака дуж умирујућег базена, пресек уз леви зид	118
Слика 4.137	Промена средњих притисака дуж умирујућег базена, пресек по средини	119
Слика 4.138	Промена пулзација притисака дуж пресека уз зид базена ...	119
Слика 4.139	Промена пулзационог притисака дуж слапишта, пресек по средини слапишта	120

Слика 5.1	Расподела утицаја у зависности од потопљености хидрауличког скока а) вертикална сила од средњих притисака, б) вертикална сила од пулзација.....	123
Слика 5.2	Коефицијент утицаја сужења брзотока на вертикалну силу од средњих притисака за половину базена: а) базни и б) диференцијални.....	125
Слика 5.3	Верификација емпиријског израза за вертикалну силу од средњих притисака на половини дна базена са резултатима мерења на моделима.....	125
Слика 5.4	Коефицијент утицаја сужења брзотока на вертикалну силу од пулзација за половину базена: а) базни и б) диференцијални	126
Слика 5.5	Верификација емпиријског израза за вертикалну силу од пулзација на половини дна базена са резултатима мерења на моделима	127
Слика 5.6	Верификација емпиријског израза за вертикалну силу од средњих притисака на узводној четвртини дна базена са резултатима мерења на моделима.....	128
Слика 5.7	Верификација емпиријског израза за вертикалну силу од пулзација на узводној четвртини дна базена са резултатима мерења на моделима.....	130
Слика 5.8	Верификација емпиријског израза за вертикалну силу од средњих притисака на низводној четвртини дна базена са резултатима мерења на моделима.....	131
Слика 5.9	Верификација емпиријског израза за вертикалну силу од пулзација на низводној четвртини дна базена са резултатима мерења на моделима.....	133
Слика 5.10	Верификација емпиријског израза за обвојницу хоризонталних силе од средњих притисака у уклештењу зида базена са резултатима на моделима	134

Слика 5.11	Верификација емпиријског израза за обвојницу максималних момената од средњих притисака у уклештењу са резултатима на моделима	135
Слика 5.12	Верификација емпиријског израза за хоризонталних силе од пулзација у уклештењу зида базена са резултатима на моделима.....	136
Слика 5.13	Верификација емпиријског израза за моменат од пулзација у уклештењу зида базена са резултатима на моделима.....	137
Слика 5.14	Поређење емпиријског израза за силу од средњих притисака на узводној бочној плочи са мерењима на хидрауличком моделу „Бузина“	139
Слика 5.15	Поређење емпиријског израза за силу од пулзација на узводној бочној плочи са мерењима на хидрауличком моделу „Бузина“	140
Слика 5.16	Поређење емпиријског израза за силу од средњих притисака на низводној бочној плочи са мерењима на хидрауличком моделу „Бузина“	140
Слика 5.17	Поређење емпиријског израза за силу од пулзација на низводној бочној плочи са мерењима на хидрауличком моделу „Бузина“	141

СПИСАК ТАБЕЛА

Табела 4.1	Размере на хидрауличком моделу бране „Бузина“	29
Табела 4.2	Резултати обраде мерних података на моделу ГФ-0М.....	54
Табела 4.3	Коефицијенти пригушења пулзационе силе на моделу ГФ-0М.....	65
Табела 4.4	Резултати обраде мерних података на моделу ГФ-0V	67
Табела 4.5	Коефицијенти пригушења пулзационе силе на моделу ГФ-0V.....	75
Табела 4.6	Резултати обраде мерних података на моделу ГФ-1М.....	77
Табела 4.7	Коефицијенти пригушења пулзационе силе на моделу ГФ-1М.....	84
Табела 4.8	Резултати обраде мерних података на моделу ГФ-1V.....	86
Табела 4.9	Коефицијенти пригушења пулзационе силе на моделу ГФ-1V.....	91
Табела 4.10	Резултати обраде мерних података на моделу ГФ-2М	93
Табела 4.11	Коефицијенти пригушења пулзационе силе на моделу ГФ-2М.....	91
Табела 4.12	Резултати обраде мерних података на моделу ГФ-2V.....	102
Табела 4.13	Коефицијенти пригушења пулзационе силе на моделу ГФ-2V.....	110
Табела 4.14	Резултати обраде мерних података на моделу ГФ-3М.....	112
Табела 4.15	Резултати обраде мерних података на моделу ГФ-3М.....	115
Табела 5.1	Поређење вертикалне силе од средњих притиска на узводној бочној плочи модела „Бузина“ и резултата емпиријских израза добијених на моделу ГФ.....	138
Табела 5.2	Поређење силе од пулзација на узводној бочној плочи са модела „Бузина“ и резултата емпиријских израза добијених на моделу ГФ.....	139

Табела 5.3	Поређење силе од средњих притисака на низводној бочној плочи са модела „Бузина“ и резултата емпиријских израза добијених на моделу ГФ.....	140
Табела 5.4	Поређење силе од пулзација на низводној бочној плочи са модела „Бузина“ и резултата емпиријских израза добијених на моделу ГФ.....	140

СПИСАК КОРИШЋЕНИХ ОЗНАКА

Грчке ознаке

Δp^+	[Pa]	максимална позитивна девијација притиска
Δp^-	[Pa]	максимална негативна девијација притиска
E	[Pa]	модул стишљивости
Φ_b	[-]	попречни коефицијент корелације
Φ_L	[-]	подужни коефицијент корелације
Φ_σ	[-]	коефицијент пулзационог притиска
L	[-]	размера за дужину на хидрауличком моделу
μ_w	[Pa s]	динамичка вискозност воде
ρ	[kg/m ³]	густина
σ	[Pa]	пулзациони притисак
τ_w	[Pa]	површински напон између воде и ваздуха
χ	[-]	релативна храпавост брзотока
θ	[°]	угао сужења брзотока
ψ_{IG}	[mm]	очитавање висинског положаја игле
Ω	[-]	потопљеност хидрауличког скока

Азбучне ознаке

P'_σ	[-]	коефицијенти пригушења пулзационе силе
U	[]	утицај на конструктивни елемент базена

Абецедне ознаке

A	[cm ²]	површина
B	[cm]	ширина
Ca_1	[-]	Кошијев број у суженом пресеку
C_p	[-]	коефицијент протицаја

\bar{C}_p	[-]	коефицијент средњег притиска
C'_p	[-]	коефицијент средњег пулзационог притиска
C_p^+	[-]	коефицијент позитивне девијације средњег притиска
C_p^-	[-]	коефицијент негативне девијације средњег притиска
F	[kN]	сила
\bar{F}	[kN]	средња сила
Fr_1	[-]	Фрудов број у суженом пресеку
f	[Hz]	фреквенца
H	[kN]	хоризонтална сила у уклештењу зида умирујућег базена
h	[cm]	висина
h_1	[cm]	прва спрегнута дубина (испред хидрауличког скока)
h_2	[cm]	друга спрегнута дубина (иза хидрауличког скока)
$h_{дв}$	[cm]	дубина доње воде
$h_{н}$	[cm]	дубина воде на крају умирујућег базена
g	[m ² /s]	гравитационо убрзање
I_{cp}	[-]	коефицијента средњег истискивања доње воде из базена
I_{σ}	[-]	коефицијент варирања истискивања доње воде из базена
L	[cm]	дужина
M	[kNm]	моменат у уклештењу зида умирујућег базена
$N_{\%}$	[%]	слагање расподеле са нормалном (Гаусовом) расподелом
\bar{P}	[Pa]	средњи притисак
p	[Pa]	притисак
Re_1	[-]	Рејнолдсов број у суженом пресеку
Q	[l/s]	проток
T	[s]	временска координата

t	[s]	време
v	[m/s]	брзина
We_1	[-]	Веберов број у суженом пресеку
X	[cm]	подужна координата у умирујућем базену
X'	[-]	релативна подужна координата у базену
Y	[cm]	попречна координата у умирујућем базену
Y'	[-]	релативна попречна координата у базену
Z	[cm]	висинска координата
Z'	[-]	релативна висинска координата

1 УВОД

Евакуационе грађевине код брана служе за контролисано одвођење воде из акумулације до корита низводног водотока. Најчешће се састоје од улазног дела (прелив), проводника (брзоток или тунел) и излазног дела (умирујући базен или ски одскок). Постоји мноштво различитих типова евакуационих грађевина, који се сврставају у неколико категорија, у зависности од најважнијих карактеристика и функције коју врше.

Хидродинамичка оптерећења настају услед механичког деловања воде на хидротехничку грађевину, или део грађевине чија је површина у додиру са водом која тече. Ова оптерећења се јављају ако вода:

1. Удара у грађевину
2. Тече око грађевине
3. Тече по површини грађевине
4. Тече кроз грађевину.

Хидродинамичка оптерећења која се јављају при веома малим брзинама воде обично се замењују „квази хидростатичким“ утицајима. Ово се показало потпуно сврсисходно, јер је утицај тих хидродинамичких оптерећења знатно мањи од одговарајућих хидростатичких. Међутим, воду која тече кроз евакуационе грађевине обично карактерише велика брзина, посебно на излазном делу. У прва три наведена начина динамичког деловања воде јављају се велике брзине течења које могу изазвати значајан потпритисак (вакуум) на површини грађевине. Потпритисак може довести до кавитационе ерозије, која за последицу често има озбиљна оштећења, па и рушења хидротехничке грађевине. Буран режим течења на излазним деловима евакуационих грађевина карактеришу велике пулзације брзине и притиска што може изазвати вибрације појединих делова грађевине, услед чега може доћи до нарушавања стабилности, оштећења, па и рушења хидротехничких објеката.

Због свог значаја хидродинамичка оптерећења су често била предмет истраживања, посебно са аспекта њиховог деловања на дно и зубе у умирујућем базену. Ова истраживања су углавном рађена за диспозиције при којима вода у умирујући базен долази преко глатког брзотока, када су

хидродинамичка оптерећења максимална, због малих губитака енергије на брзотоку. Такође сва досадашња истраживања су се односила на случајеве када вода у умирујући базен долази преко призматичног брзотока. Углавном, ова истраживања нису уопште ни обухватала брзоток, већ су претпостављала да вода у умирујући базен долази задатом брзином у паралелном млазу. Приликом досадашњих истраживања оптерећењу на зидове базена није посвећена довољна пажња (ни за глатке брзотоке).

Развојем технологије ваљаног бетона, све је актуелнија употреба степенастог брзотока на низводној контури гравитационе бетонске бране, јер се на тај начин смањује енергија воде која долази у умирујући базен. Због тога се јавља потреба за истраживањима која би испитала хидродинамичка оптерећења у умирујућим базенима иза степенастог брзотока.

Циљ ове дисертације је испивање утицаја геометрије степенастог брзотока на хидродинамичка оптерећења у умирујућем базену. У том смислу разматрани су степенести брзотоци различитог степена сужења и са различитим висинама степеника. На физичком моделу испитано је 8 различитих геометријских диспозиција степенастог брзотока. Испитивање је вршено за 3 протока (за сваку од диспозиција брзотока) и за 4 ÷ 5 дубина доње воде, како би се одредио утицај ових параметара на хидродинамичко оптерећење на дно и зидове умирујућег базена.

Резултати мерења на физичком моделу искоришћени су за добијање емпиријских израза помоћу којих се могу одредити хидродинамичке силе на дно и зидове умирујућег базена.

У поглављу 2 Опис проблема, приказани су различити типови евакуационих објеката и одговарајућа хидродинамичка оптерећења која се у њима јављају. Наведени су и најчешћи проблеми које хидродинамичка оптерећења могу изазвати на хидротехничким грађевинама.

Поглавље 3 приказује најзначајније радове у којима се разматра хидродинамичко оптерећење у умирујућим базенима. Даје се преглед досадашњих истраживања, као и њихови најзначајнији резултати и закључци.

Физички модел, мерења која су вршена на њему, мерни инструменти, као и добијени резултати истраживања, приказани су у поглављу 4. Овде је приказан и хидраулички модел бране „Бузина“, који је служио за верификацију добијених резултата.

Обрада резултата мерења на физичком моделу, анализа њихове параметарске зависности, као и добијени емпиријски изрази, приказани су у поглављу 5. У оквиру овог поглавља приказано је и поређење резултата добијених на основу емпиријских изрази утврђених на физичком моделу и резултата мерења на хидрауличком моделу бране „Бузина“.

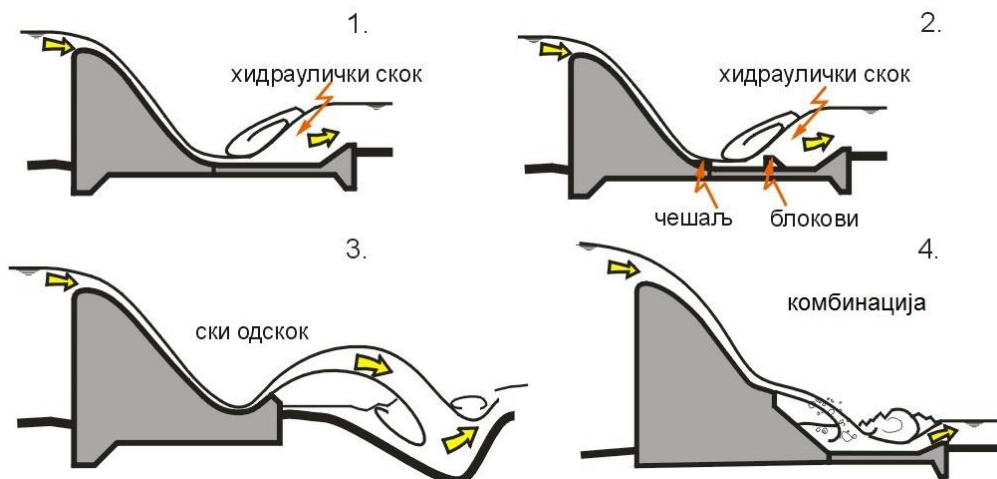
У поглављу 6, су дати закључци и приказани правци даљих истраживања.

2 ОПИС ПРОБЛЕМА

Евакуациони објекти на бранама имају задатак да вишак воде који се јави у акумулацији безбедно спроведу у низводни водоток. Под појмом "безбедно" мисли се да приликом спровођења вишка воде не буде угрожена ни сама хидротехничка грађевина, као ни низводно подручје. Због тога се приликом пројектовања хидротехничких грађевина посебна пажња поклања умирењу преливене воде.

Најчешће диспозиције евакуационих органа, дате су на слици 2.1:

1. Умирујући базен у коме се формира хидраулички скок
2. Умирујући базен са препрекама у које млаз удара (чешљеви, зуби, блокови, одбојни зид)
3. Ски одскок
4. Комбинација ски одскока и умирујућег базена.



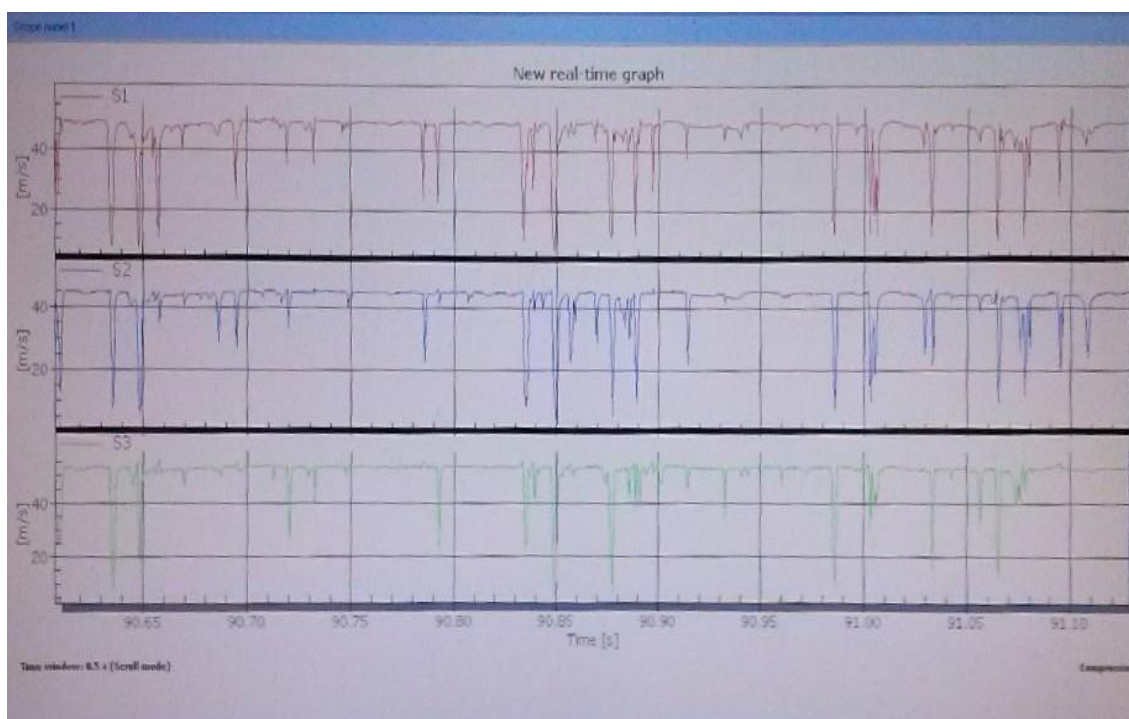
Слика 2.1 Најчешће диспозиције евакуационих органа, [12]

Заједничка карактеристика свих умиривача енергије је да на њих делује значајно хидродинамичко оптерећење. У случају када се умирење енергије врши помоћу препрека, хидродинамичко оптерећење је реакција на силу којом препрека делује на млаз воде. Ова сила је пропорционална кинетичкој енергији млаза, површини препреке управно на ток, а такође зависи и од облика препреке. У случају умирења помоћу скретања млаза (ски одскок), хидродинамичка сила је такође реакција на силу којом

контура мења правац течења. У овом случају сила зависи од кинетичке енергије млаза, закривљености "кашике" и скретног угла, [13].

Када се умирење млаза врши хидрауличким скоком (слика 2.3) у умиривачу се успоставља сложено струјање са веома развијеном турбуленцијом, услед чега долази до појаве пулзација брзина, притисака и сила (слика 2.2). Док се хидродинамичка оптерећења изазвана препрекама у млазу воде могу добро описати помоћу осредњених вредности брзине (односно кинетичке енергије млаза), код струјања са изразитом турбуленцијом морају се посматрати и пулзације. Пулзације брзине и притиска у некој тачки умирујућег базена су последица сталног померања млаза и вртложног ваљка хидрауличког скока.

Према истраживањима са постојећих објеката и мерењима у лабораторији, максимални пулзациони додатак притиска у некој тачки дна умирујућег базена може достићи и до 40 % кинетичке енергије (брзинске висине) улазног млаза, док средње квадратно одступање износи $10 \div 12\%$ брзинске висине, [12].



Слика 2.2 Дијаграм пулзација притисака у умирујућем базену

Хидродинамичко оптерећење које је последица пулзација притисака не јавља се истовремено у свим тачкама умирујућег базена. То је

олакшавајућа околност, јер се тако смањују меродавни утицаји на плоче и зидове умирујућег базена. Како би се одредили ови утицаји неопходно је посматрати корелацију пулзационих притисака између тачака у базену, [2]. Према томе, за одређивање хидродинамичког оптерећења у умирујућем базену потребна је статистичка обрада измерених величина.

Хидродинамичко оптерећење у умирујућем базену са хидрауличким скоком зависи од кинетичке енергије млаза, протока и нивоа доње воде. Поред тога на њега утиче и геометрија, како степенастог брзотока (подужни нагиб дна, степен сужења и висина и облик степеника), тако и геометрија самог умирујућег базена. Такође, на појединим моделским испитивањима примећено је да на хидродинамичка оптерећења у низводном делу базена утицај може да има и геометрија низводног водотока. У случају наглог сужења низводног корита, постоји могућност појаве хоризонталних вртлога иза хидрауличког скока, што утиче на расподелу хидродинамичког оптерећења.



Слика 2.3 Хидраулички скок у умирујућем базену бране „Елк сити“, фотографија је преузета са интернет адресе:

www.boatingabc.com/forums/ubbthreads.php/topics/395066.html

Проблеми које хидродинамичко оптерећење може изазвати код умирујућих базена су бројни, што је последица изразито сложеног струјања. Најчешће се сусрећу:

1. Динамички узгон
2. Кавитациона ерозија
3. Вибрације.

Појава динамичког узгона је суперпонирање хидродинамичког потпритиска на плочи и узгона испод плоче умирујућег базена. Ова комбинација утицаја може изазвати нарушавање стабилности умирујућег базена, нарочито ако су плоче дна малих димензија, слика 2.4.

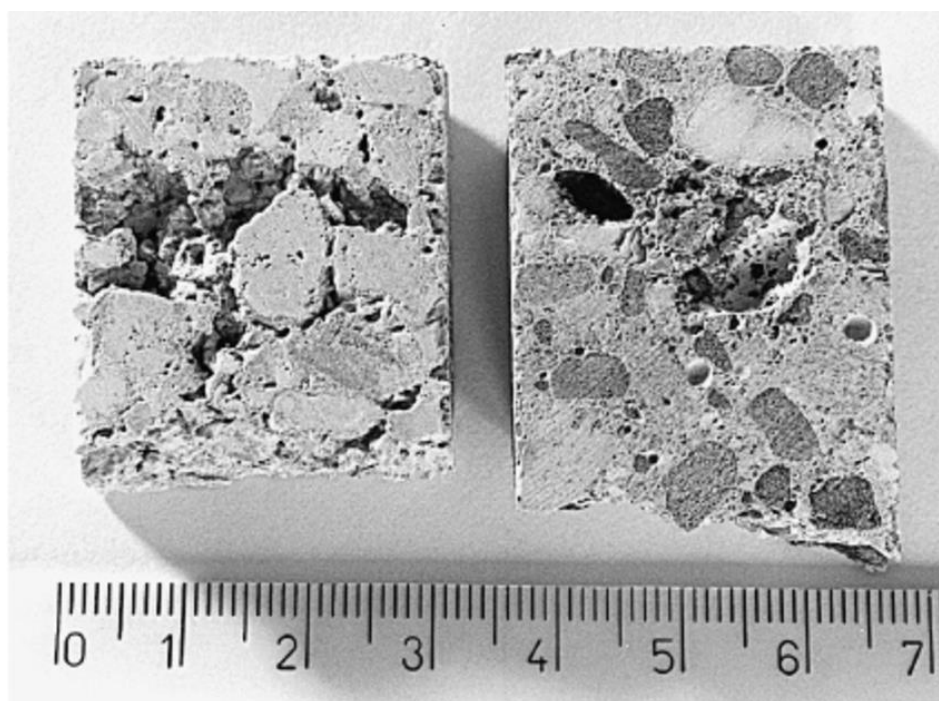


Слика 2.4 Оштећења од динамичког узгона на брани „Тарбела“ у Пакистану, фотографија је преузета са интернет адресе: <http://phoenix-hodge.com/tarbela.php>

Кавитација настаје услед кључања воде при сниженом притиску, при чему долази до снажних имплозионих таласних удара при колабирању мехура, када пара уђе у зону повишеног притиска, [12]. Кавитација код хидротехничких објеката може изазвати оштећења на контури (површини), која називамо кавитационом ерозијом (слика 2.5).



Слика 2.5 Кавитација у умирујућем базену, фотографија преузета са интернет адресе: www.usbr.gov/ssle/damsafety/risk/BestPractices/Chapters/VI-3-20150610.pdf



Слика 2.6 Кавитациона ерозија, фотографија преузета са интернет адресе: www.researchgate.net/figure/Macroscopic-view-on-the-cavitation-damage-for-t-C-s-10-s-Left-concrete-1-Right_fig3_222878939

Вибрације настају као последица пулзација притисака. Посебно је опасно уколико неки хармоник хидродинамичког оптерећења има учесталост блиску сопственој учесталости неког елемента хидротехничке грађевине, или хидромеханичке и машинске опреме. Тада због појаве резонанце може доћи до великих оштећења, па и рушења делова објекта.

3 ПРЕТХОДНА ИСТРАЖИВАЊА

Већ више од педесет година евакуациони објекти на бранама су предмет озбиљних истраживања широм света. Велики број истраживања је вршен на различитим типовима брзотока, ски одскока и умирујућих базена, на основу чега су усавршени поступци прорачуна карактеристика течења, одговарајућих утицаја и дате препоруке за димензионисање ових објеката. Бранама са степенастим брзотоком је међутим тек последњих тридесет година посвећена извесна пажња истраживача. Највећи број истраживања на бранама са степенастим брзотоком обрађује само течење у брзотоку, док је мало испитивања о утицајима које такав ток врши на умирујући базен.

Процену утицаја на дно и зидове умирујућег базена највећи број истраживача врши на основу података добијених, ређе на самом објекту, а знатно чешће на физичком моделу. Поступци који се при томе користе су:

- а. мерење притисака на већем броју мерних места и статистичка обрада добијених података.
- б. директно мерење силе на основу деформације у ослонцима.

Највећу тешкоћу при одређивању хидродинамичких утицаја у умирујућим базенима представљају пулзације у хидрауличком скоку. Истраживања ових оптерећења врше се у циљу утврђивања узрока настанка штетних појава, попут одизања плоча конструкције, кавитационе ерозије и вибрација.

Сам почетак проучавања хидродинамичких утицаја је имао експериментални карактер и везан је за рад Рауса са сарадницима из 1959. године, у којем је моделски испитиван хидраулички скок у цеви, [17]. Раус је тада за описивање карактеристика пулзација у хидрауличком скоку користио особине нормалне расподеле и применио одговарајућу статистичку анализу.

Интересовање за оптерећења која делују на евакуационе органе хидротехничких објекта је нагло порасло после више оштећења и рушења оваквих објеката. Посебан проблем су представљале ситуације у којима је до оштећења на објектима за умирење енергије долазило и при знатно мањим протоцима од оних за које су они димензионисани. Године 1961. је

дошло до знатних оштећења евакуационих објеката на хидроенергетском систему Карнафули, иако је проток био свега 20% од пројектованог. У свом извештају Боверс, Цаи и Куха су закључили да су пулзациони притисци у зони хидрауличког скока повећали узгон довољно да дође до издизања плоча у дну конструкције, [1]. Ово је потврђено и моделским испитивањима конструкције хидроенергетског система Карнафули, које су Тосо и Боверс спровели 1987. године, [10]. Резултати ових испитивања су првенствено показали да су оштећења изазвана великим пулзацијама притиска у зони хидрауличког скока, односно да:

1. пулзациони притисци могу оштетити заптивне траке између плоча конструкције што резултује преношењем екстремних притисака кроз отворену спојницу са горње на доњу површину плоче.
2. остварени збирни притисак са обе стране плоче може достићи вредности које превазилазе тежину плоче.
3. велику улогу у достизању силе довољне за подизање плоче може имати и тренутна неповољна расподела пулзационог притиска.

Василиев и Букрејев 1967. године раде интересантну студију о пулзацијама притиска у хидрауличком скоку, [15]. Они тада дефинишу хидродинамичко оптерећење које делује на површине објекта у коме се формира хидраулички скок, [17].

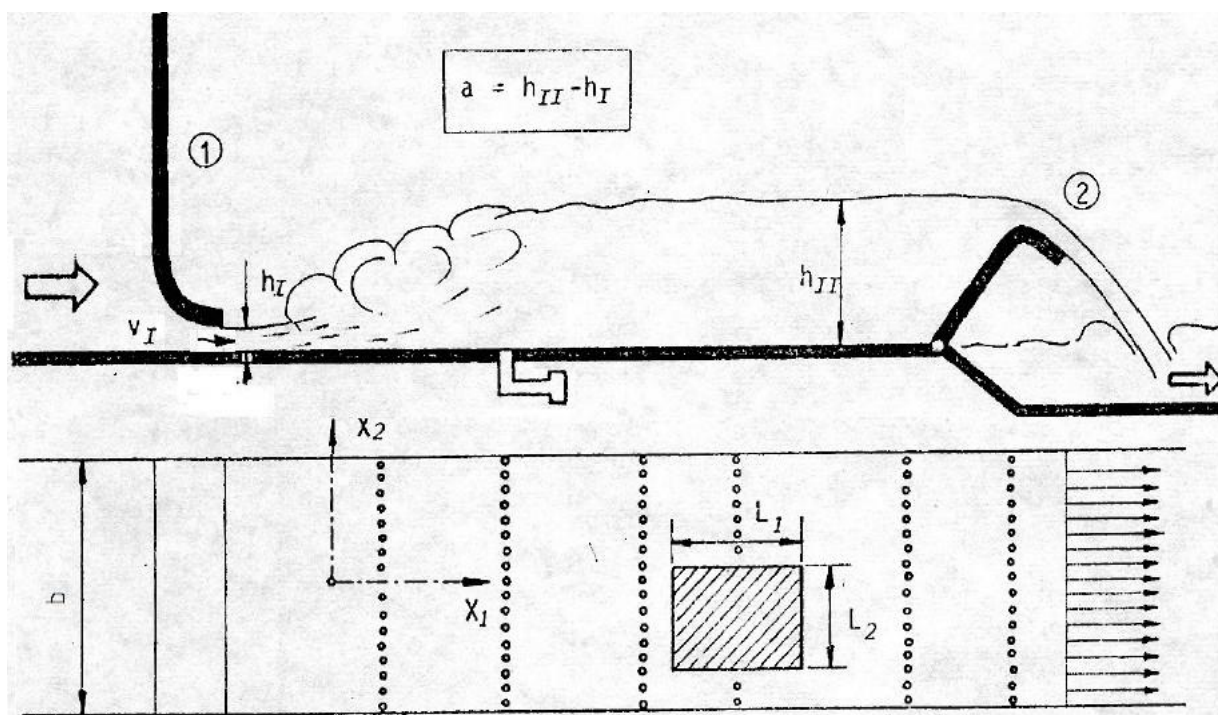
Од 1968. године обимна истраживања пулзација притисака на чврсте контуре спроводу се у хидрауличкој лабораторији Грађевинског факултета Универзитета у Београду. Професор Георгије Хајдин, [2] анализира процену максималних утицаја хидродинамичког оптерећења са становишта вероватноће његове појаве. Такође, на примеру моделског испитивања бочног хидродинамичког оптерећења на средишње зубе у слапишту, Хајдин показује да се вођењем рачуна о истовремености пулзација у мерним тачкама помоћу коефицијената корелације, добијају знатно мањи утицаји од оних који се добијају без узимања у обзир овог ефекта. У истом раду се приказује и методологија анализе периодичности пулзација на једном мерном месту помоћу коефицијента аутокорелације и његовог развијања у бесконачни Фуријеов ред, [6].

Током седамдесетих и осамдесетих година прошлог века, у Хидрауличкој лабораторији Грађевинског факултета у Београду, под руковотством професора Хајдина, спроводи се велики број истраживања хидродинамичких оптерећења на различитим евакуационим објектима брана. У једном од тих истраживања Хајдин и Генцел на моделу бучнице за умирење воде иза хидротехничког тунела, испитују пулзације притиска у дну, [3]. Они у овом истраживању запажају да извесни пикови у дијаграмима измерених притисака могу делимично да поремете нормалну расподелу. Такође анализирају периодичност пулзација помоћу Строухаловог броја и показују да на испитиваној конструкцији не постоји опасност од појаве вибрација.

Хајдин и Иветић, 1981. године, истражују пулзације и у базену у који вода пада, што је карактеристично за евакуационе објекте лучних брана, али и за корито иза ски одскока. Ово истраживање је показало да дубина доње воде има доминантан утицај, како на средње притиске, тако и на пулзације на дно базена у који вода пада, [4]. Добијени резултати су били у то време изненађујући, јер је превладало мишљење да доминантан утицај има проток. Практично истовремено са овим истраживањем, Хајдин и Аранђеловић упоређују два постојећа поступка одређивања хидродинамичких утицаја на дно: преко мерења притисака у више тачака и преко непосредног мерења, односно одређивања деформација на специјално припремљеним ослонцима плоче, [5]. Ово истраживање је показало да се највећи хидродинамички утицаји добијају мерењем притисака и њиховом обрадом не водећи рачуна о истовремености. Значајно мањи утицаји се добијају уколико се води рачуна о истовремености пулзација. Вредности утицаја добијених из деформација у ослонцима, добро се слажу са вредностима добијеним кад се водило рачуна о истовремености пулзација. Такође је примећено да је поступак непосредног мерења хидродинамичких утицаја знатно захтевнији и компликованији од мерења притисака.

Шпољарић и Хајдин су 1984. године, у Институту за хидротехнику Грађевинског факултета у Београду, истраживали пулзациону силу на дно испод слободног хидрауличког скока. Резултат овог истраживања је поступак за процену пулзационе силе на плочу у дну произвољних

димензија $L_1 \times L_2$, са положајем тежишта на X_1 од почетка хидрауличког скока и X_b осе слапштва (слика 3.1), [7].



Слика 3.1 Диспозиција опитне инсталације за непотопљен хидраулички скок, [7]

Укупна пулзациона сила на плочу може се проценити као:

$$F' = \rho \cdot \frac{v_1^2}{2} \cdot A \cdot K \cdot \Phi_p \cdot \Phi_L \cdot \Phi_b \quad (3.1)$$

где су:

ρ - густина

v_1 - брзина непосредно испред хидрауличког скока

A - површина плоче

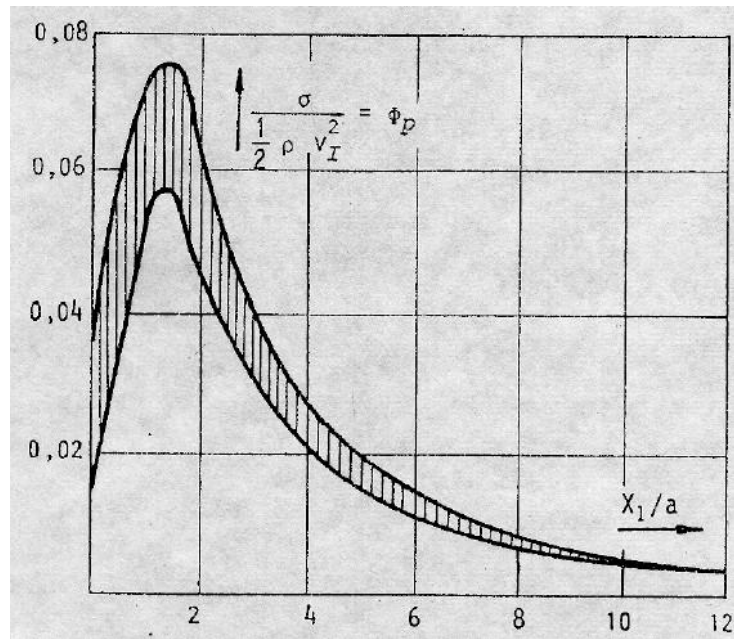
K - фактор дефинисан вероватноћом појаве силе ($K_{0,2\%} = 3,09$)

Φ_p - коефицијент пулзационог притиска

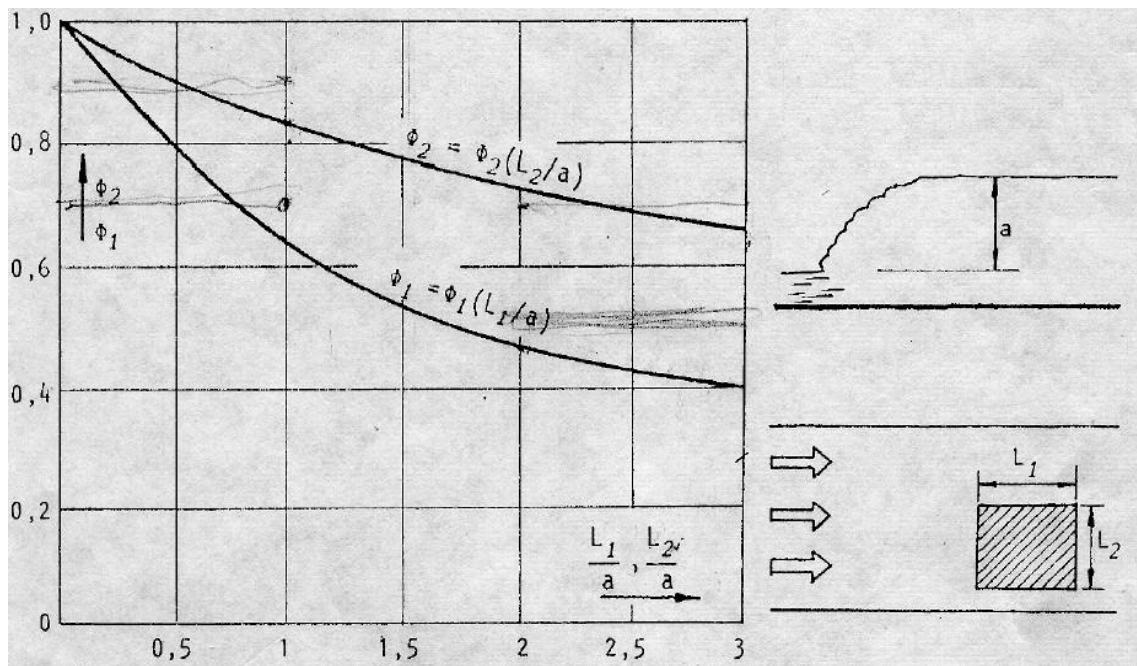
Φ_L - подужни коефицијент корелације

Φ_b - попречни коефицијент корелације

Коефицијент пулзационог притиска Φ_p добија се са дијаграма приказаног на слици 3.2, а подужни и попречни коефицијенти корелације, Φ_L и Φ_b са дијаграма приказаног на слици 3.3.



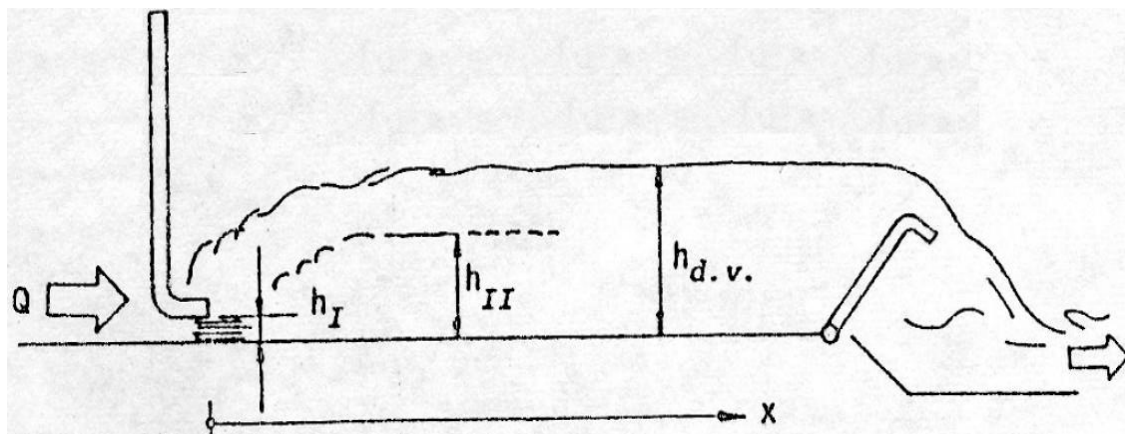
Слика 3.2 Дијаграм коефицијената пулзационих притисака, [7]



Слика 3.3 Дијаграм подужних и попречних коефицијената корелације [7]

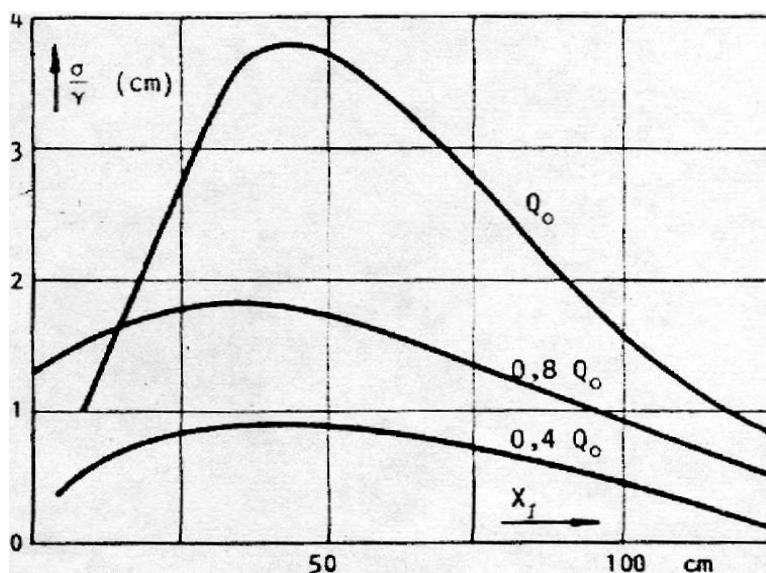
У наставку овог истраживања Хајдин, Покрајац и Стевановић, врше испитивање на истој инсталацији, али са потопљеном хидрауличким

скоком, [8], који се добија подизањем уставе 2 (слика 3.4). Закључци који су при томе добијени се пре свега односе на расподелу пулзационих притисака у базену.



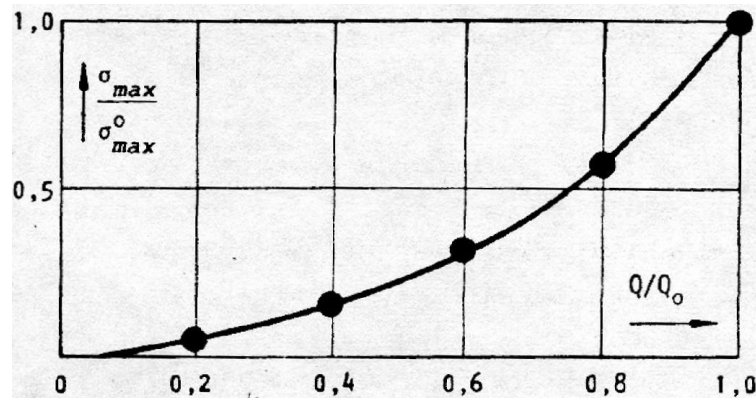
Слика 3.4 Диспозиција опитне инсталације за потопљен хидраулички скок [8]

Први закључак је да пулзације у једном попречном пресеку базена само незнатно варирају, те се може посматрати само један подужни пресек и закључци генерализовати за цео базен. Приликом смањивања протока од вредности Q_0 (за коју је базен пројектован), до $Q_0/5$, добја се најпре нагли, а потом све блажи пад вредности пулзационих притисака, при чему се положај на којем се добија њихова максимална вредност помера узводно (слика 3.5).



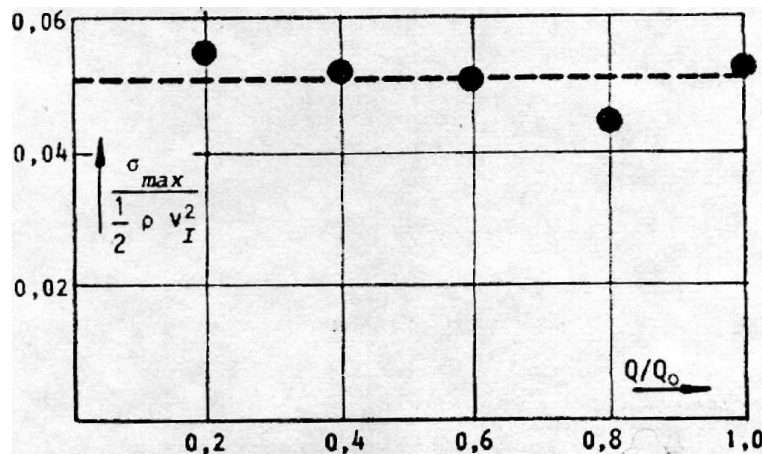
3.5 Дијаграми пулзационих притисака у зависности од протока, [8]

Посебно је анализирана зависност максималне вредности пулзационог притиска од протока. (слика 3.6)



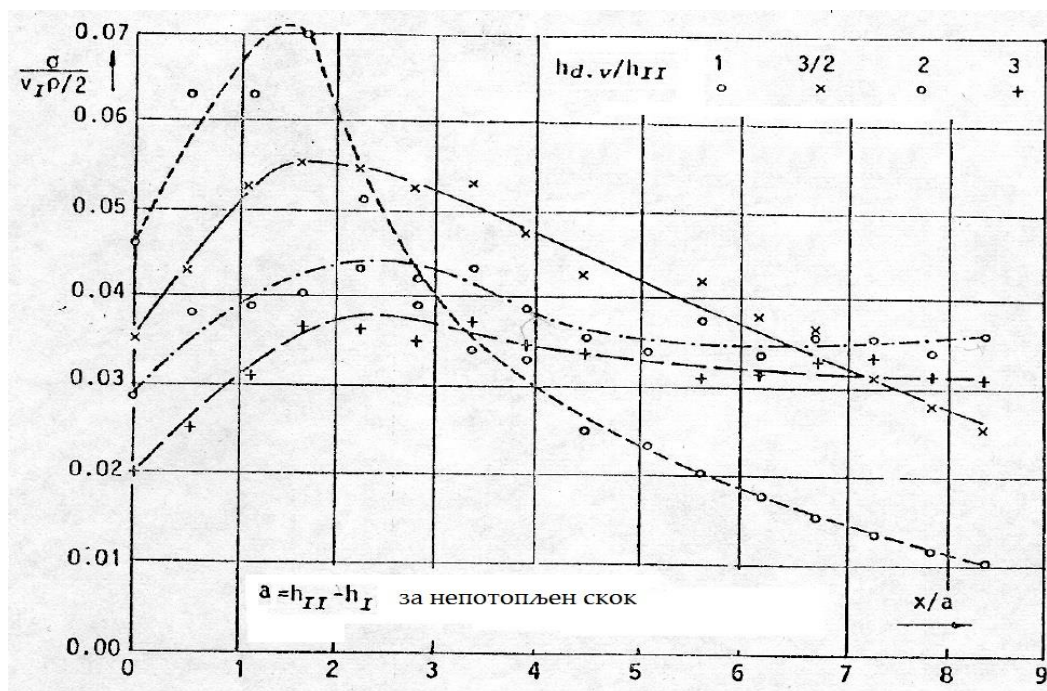
3.6 Дијаграм максималних пулзационих притисака у зависности од протока, [8]

Анализа односа максималног пулзационог притиска и зауставног притиска на почетку базена, показује веома мале варијације при промени протока. Практично се може рећи да не зависи од њега (слика 3.7).



3.7 Дијаграм односа максималних пулзација и зауставног притиска у зависности од протока, [8]

Комплетне резултате истраживања пулзационе силе на дно испод потоњеног хидрауличног скока Хајдин и Стевановић објављују 1986. године [9]. За неколико различитих вредности потапања хидрауличног скока мерени су притисци дуж базена. Пулзациони притисци на дно су добијени као стандардна девијација измерених притисака и посматрана је њихова расподела дуж базена у зависности од потоњености хидрауличног скока (слика 3.8).



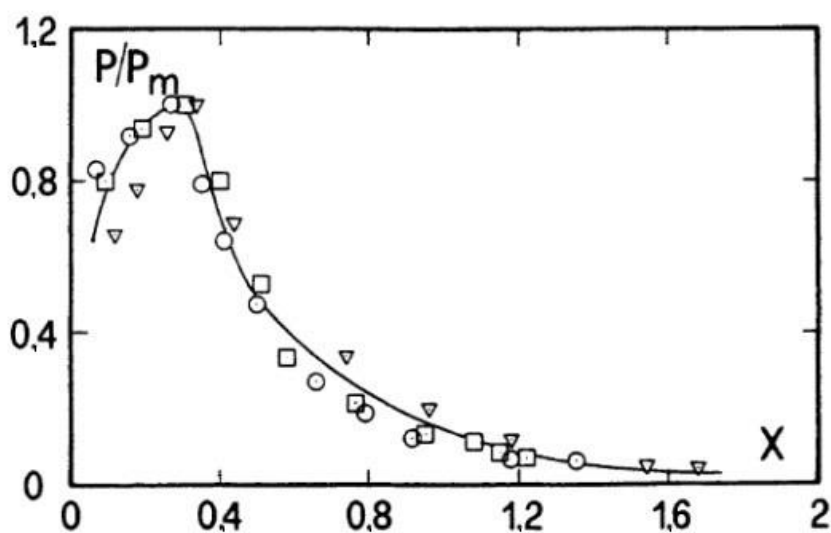
3.8 Дијаграми пулзационих притисака у зависности од потапања хидрауличког скока, [9]

Аутори закључују да се иста кинетичка енергија, коју вода има на почетку, равномерније умирује дуж базена, што је степен потопљености хидрауличког скока већи. Због тога се добија смањење вредности максималних пулзација притиска и већа површина његовог деловања што је хидраулички скок више потопљен. Из овога је проистекао и важан савет за практичну примену да се мора обратити посебна пажња на укупну пулзациону силу на плоче базена, јер се и поред смањења максималне вредности оптерећења, због веће површине дејства, може повећати њена укупна вредност. Укупна пулзациона сила на неку плочу дна базена може се проценити на сличан начин као и код непотопљеног хидрауличког скока (израз 3.1), само се за одговарјућу потопљеност на основу коефицијената корелације мора одредити коефицијент:

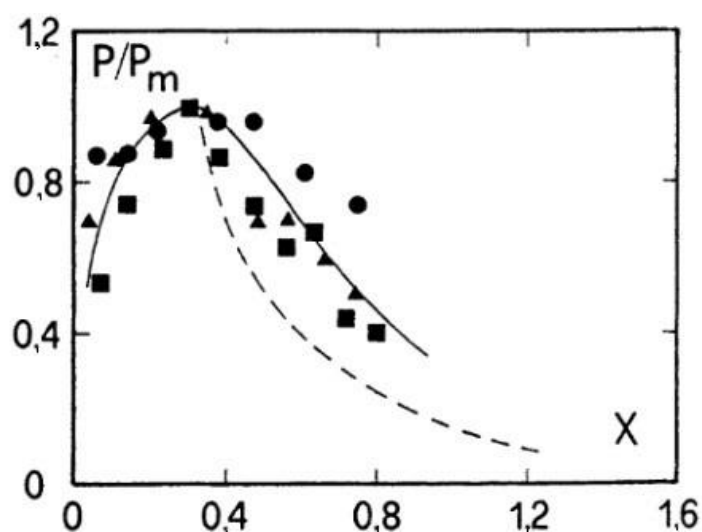
$$\Phi_L = \Phi_L \left(\frac{h_{d.v.}}{h_{II}} \right) \quad (3.2)$$

Начелно постоји незнатна разлика и у коефицијенту Φ_p за потопљен и непотопљен хидраулички скок, али се коришћењем дијаграма са слике 3.2 остаје на страни сигурности при процени.

Паралелно са истраживањима у Хидрауличкој лабораторији Грађевинског факултета Универзитета у Београду, пулзационе силе су предмет истраживања и у друких хидрауличких лабораторија. Абдул Кадер и Ерланго независно од Акбарија са сарадницима, 1982 године врше истраживања пулзационих притисака у класичним умирујућим базенима, [11]. За различите Фрудове бројеве, они добијају поприлично сличне подужне расподеле пулзационих притисака (слике 3.9 и 3.10).



Слика 3.9 Расподела пулзационих притисака по Абдулу Кадеру и Ерлангу
(∇) $Fr = 4,7$; (\circ) $Fr = 5,5$; (\square) $Fr = 6,6$; (—) средња линија, [11]



Слика 3.10 Расподела пулзационих притисака по Акбарију (\bullet) $Fr = 6,2$; (\blacktriangle) $Fr = 8,4$; (\blacksquare) $Fr = 11,5$; (—) средња линија; (---) средња линија из по Абдулу, [11]

У својој књизи "Хидраулика брзотока и умиривача енергије", [11] Кацурија даје широки преглед аутора који су се бавили хидродинамичким силама у слапишту. За процену пулзационих сила он користи притиске добијене мерењем p на основу којих одређује остале параметре,

средњи притисак:

$$\bar{P} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T p \cdot dt \quad (3.3)$$

пулзациони притисак:

$$\sigma = p - \bar{P} \quad (3.4)$$

средњу вредност пулзационог притиска:

$$\sqrt{\overline{\sigma^2}} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T (\sigma)^2 \cdot dt} \quad (3.5)$$

на основу којих уводи три типа коефицијената притиска:

1. коефицијент средњег пулзационог притиска:

$$C'_p = \sqrt{\overline{\sigma^2}} / \frac{v_1^2}{2 \cdot g} \quad (3.6)$$

2. коефицијент девијације средњег притиска:

$$C_p^+ = \Delta p^+ / \frac{v_1^2}{2 \cdot g} \quad (3.7)$$

$$C_p^- = \Delta p^- / \frac{v_1^2}{2 \cdot g} \quad (3.8)$$

где су: Δp^+ нмаксимална позитивна и Δp^- нмаксимална негативна девијација притиска

3. коефицијент средњег притиска:

$$\bar{C}_p = \bar{P} / \frac{v_1^2}{2 \cdot g} \quad (3.9)$$

Кацурија даје и генералне закључке о пулзационом оптерећењу до којих се дошло током истраживања:

1. Интензитет коефицијента средњег флукуационог притиска C'_p зависи од развијености млаза.
2. Максимални интензитет C'_p је 0,07 за потпуно развијен млаз и 0,08 за неразвијен млаз.
3. Опадање интензитета C'_p је упадљивије и брже за слободни хидраулички скок него за потопљени.
4. Корелације у подужном правцу су слабије изражене него у попречном.
5. Доминантне фреквенције пулзација су од 2 до 5 Hz.
6. Коефицијенти девијације средњих притисака су 10 до 20 пута већи од коефицијента средњег пулзационог притиска.

Најновија истраживања пулзационог оптерећења углавном се врше на атипичним слапиштима, најчешће са блоковима. Ова истраживања, као у осталом и ранија, углавном теже да за дају процену пулзационе компоненте хидродинамичке силе која се може јавити на блоковима и плочама у дну умирујућег базена. Ретка су истраживања која су се бавила утицајем пулзационог оптерећења на бочне зидове умирујућих базена.

4 МОДЕЛСКА ИСПИТИВАЊА

4.1 Опис модела

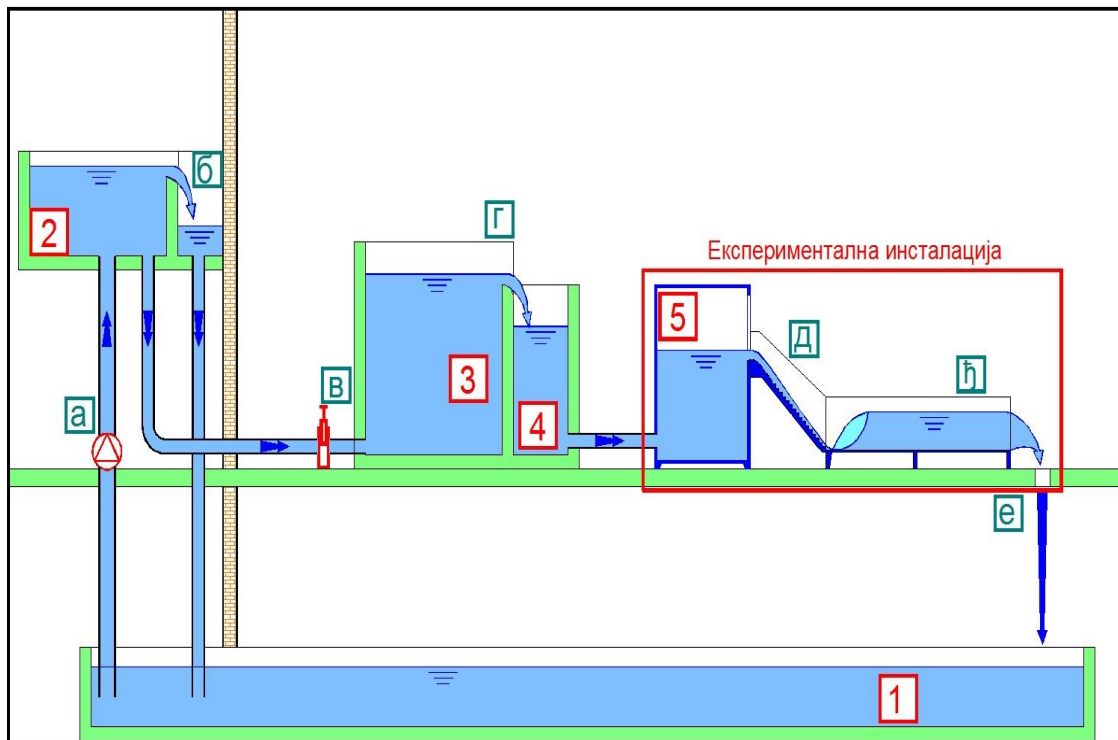
Моделска испитивања су вршена на физичким моделима. У Хидрауличкој лабораторији Грађевинског факултета у Београду вршена су испитивања на физичком моделу са променљивом геометријом (ГФ модел), док су у Хидрауличкој лабораторији института "Јарослав Черни" вршена испитивања на хидрауличком моделу бране „Бузина“.

4.1.1 Опис модела у лабораторији на Грађевинском факултету

Да би се испитали хидродинамички пририсици у умирујућем базену коришћен је физички модел на коме су мењане поједине геометријске карактеристике (Г.Ф. модел). Овакав геометријски променљив физички модел омогућио је испитивање хидродинамичког оптерећења у умирујућем базену, не само при различитим хидрауличким условима (проток и дубина доње воде), већ и при различитим диспозицијама степенастог брзотока (степен сужења и висина степеника).

Моделска испитивања су вршена у Хидрауличкој лабораторији Института за хидротехнику и водноеколошко инжењерство, који је део Грађевинског факултета Универзитета у Београду. Схема мерне инсталације приказана је на слици 4.1.

Инсталација користи воду из доњег базена (1) који је смештен на најнижем нивоу. Ова вода се пумпом капацитета 100 l/s подиже на највиши ниво, у горњи резервоар (2). Вода из горњег резервоара делом улази у цев која води до следећег низводног резервоара (3), а делом се прелива преко дугачке преливне ивице лавиринт прелива и враћа се у доњи резервоар. Ниво воде у горњем резервоару је практично константан током испитивања, јер је преливна ивица веома дугачка, па се висина преливног млаза занемарљиво мало мења са променом протока преко њега. На спојној цеви горњег резервоара (2) са низводним резервоаром (3) је постављен затварач (в), којим се врши регулација протока који долази у експерименталну инсталацију. Сав вишак воде из горњег резервоара који не пролази кроз регулациони затварач (в), враћа се у доњи резервоар преко растеретног прелива.



Слика 4.1 Схематски приказ инсталације за моделска испитивања

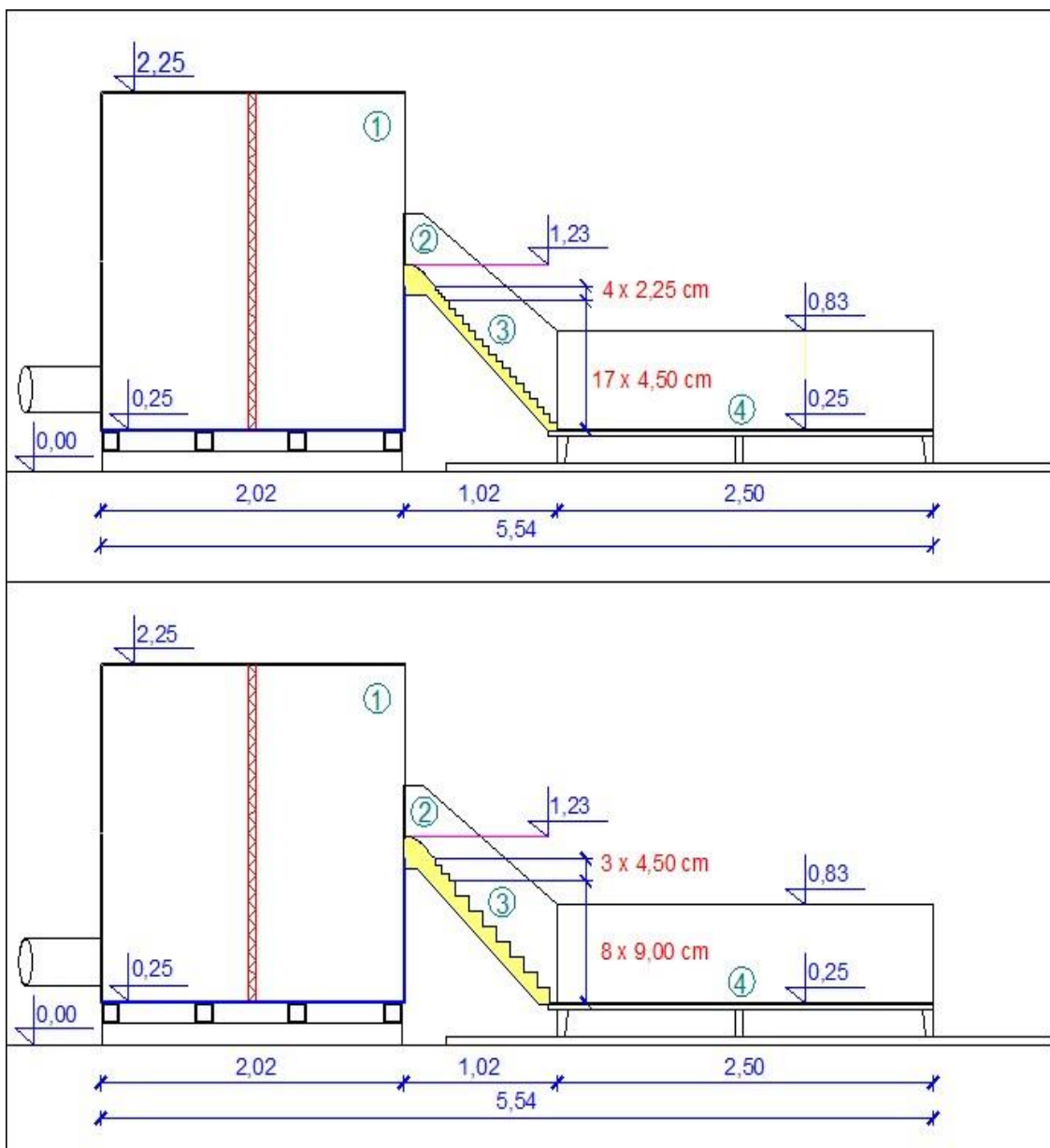
1 – доњи базен, 2 – горњи резервоар, 3 – резервоар са Томсоновим преливом за мерење протока, 4 – резервоар за умирење воде, 5 – резервоар у оквиру експерименталне инсталације, а – пумпа, б – растеретни (лабиринт) прелив, в – регулациони затварач, г – Томсонов прелив, д - степенasti брзоток, ђ - умирујући базен, е - сливник

На излазу из резервоара (3) налазе се два Томсонова прелива (г), на којима је дефинисана једнозначна веза између нивоа воде у резервоару и протока. Вода преко Томсонових прелива долази у базен за умирење (4). Базен је помоћу цеви спојен са резервоаром (5), који представља део експерименталне инсталације. Истицање из спојне цеви у резервоар (5) је потопљено, па проток воде кроз њу зависи само од разлике нивоа воде између суседних резервоара, базена за умирење (4) и резервоара (5).

Резервоар (5) је најзводнији део експерименталне инсталације. Из њега вода, преко прелива практичног профила, долази до степенастог брзотока (д). Брзотоком (д) вода се спушта у умирујући базен (ђ), где су вршена експериментална испитивања. Вода се након изласка из умирујућег базена (ђ), преко сливника (е) враћа у доњи базен (1). На тај начин је омогућена циркулација воде у лабораторији.

Експериментална инсталација (слика 4.2) се састоји од:

1. Узводног резервоара са решетком за умирење нивоа воде
2. Прелива практичног профила
3. Степенастог брзотока
4. Умирујућег базена.



Слика 4.2 Подужни пресек кроз мерну инсталацију

1– резервоар у оквиру експерименталне инсталације, 2 – прелив практичног профила, 3 – степенести брзоток, 4 – умирујући базен

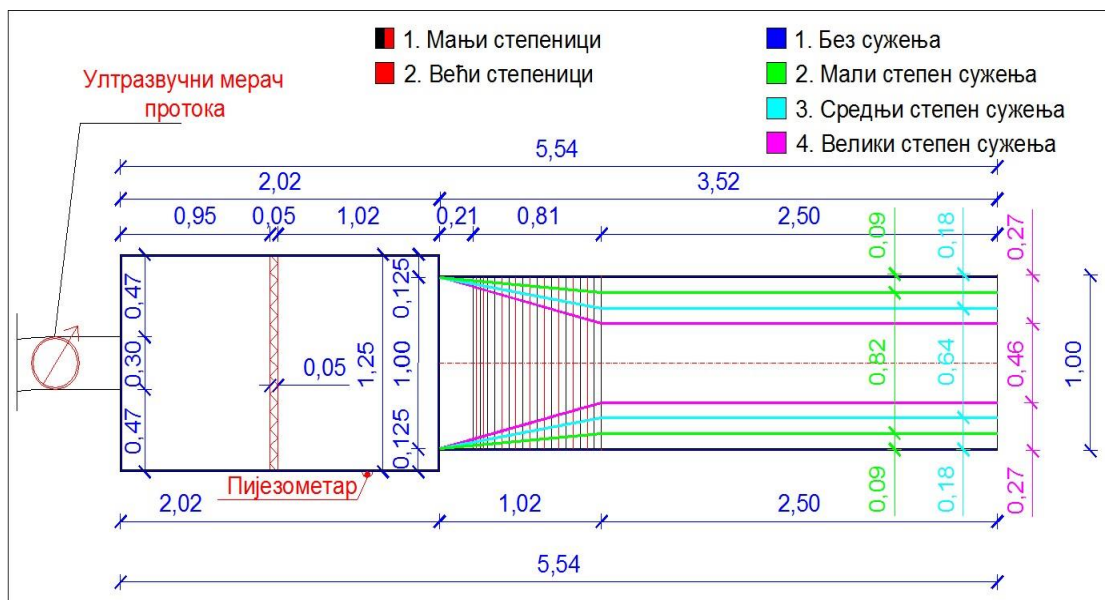
Узводни резервоар и прелив практичног профила су непроменљиви делови експерименталне инсталације. Степенасти брзоток је током испитивања имао две различите диспозиције висина степеника у брзотоку:

1. Мањи степеници (4 узводна $h_{y.} = 2,25$ cm и осталих 17 $h_{n.} = 4,5$ cm)
2. Већи степеници (3 узводна $h_{y.} = 4,5$ cm и осталих 8 $h_{n.} = 9$ cm),

и четири диспозиције са различитим степенима сужења (слика 4.3):

1. Без сужења (ширина на крају брзотока је $B_{c1} = 98 + 2$ cm)
2. Мали степен сужења ($B_{c2} = 78 + 2$ cm)
3. Средњи степен сужења ($B_{c3} = 58 + 2$ cm)
4. Велики степен сужења ($B_{c4} = 38 + 2$ cm).

Ове диспозиције су међусобно комбиноване, тако да је укупно имало осам различитих диспозиција степенастог брзотока и умирујућег базена. Сагласно са различитим степенима сужења брзотока и умирујући базен је имао четири диспозиције са различитим ширинама.



Слика 4.3 Основа мерне инсталације

При избору диспозиције брзотока и умирујућег базена, разматрала се и могућност да уместо са обе стране, сужење буде само са једне при чему би се формирала једна страна симетричног модела. Такав модел би са

истим протокоп омогућио истраживање на ширем брзотоку и слапишту. Од овакве диспозиције се одустало из више разлога:

Најпре није постојала могућност да се у самој оси симетрије поставе мерни инструменти, а постављање у непосредној близини би дало непоуздане резултате због утицаја трења. Пошто се није располагало никаквом проценом расподеле притисака у умирујућем базену иза непризматичног брзотока било је неопходно прецизно одредити расподелу притисака у попречним пресецима. Повећање ширине слапишта би изискивало и већи број мерних места што би због малог броја мерних инструмената знатно компликовало мерења, или би се морала усвојити ређа мрежа мерних тачака која не захтева више сонди али захтева дуже каблове конектора.



Слика 4.4 Дрвена решетка за умирење нивоа воде у резервоару

На узводном крају експерименталне инсталације се налази резервоар димензија 200 x 125 x 200 cm. Дно резервоара се налази на коти +0,25 cm у односу на под хале (слика 4.2) Вода у њега улази преко спојне цеви на коју је постављен ултразвучни мерач протока. Доток у резервоар се подешава помоћу регулационог затварача, а мери се како на ултразвучном мерачу протока, тако и на Томсоновом преливу, пре уласка у

експерименталну инсталацију. Унутар овог резервоара налази се дрвена решетка која има за циљ умирење нивоа воде у резервоару (слика 4.4).

Описана инсталација обезбеђује устаљене услове течења, па је проток на улазу у резервоар једнак оном на излазу, односно протоку који излази из резервоара.



Слика 4.5 Прелив практичног профила на ГФ моделу

Вода из резервоара истиче преко прелива практичног профила (слика 4.5) ширине 100 cm и дужине 21 cm. Прелив је на боковима хидраулички обликован у циљу умањења бочне контракције млаза.



Слика 4.6 - Степенасти брзоток на ГФ моделу

Са прелива вода долази до степенастог брзотока (слика 4.6), преко којег се на дужини од 81 cm спушта за висинску разлику од 72 cm до умирујућег базена (слика 4.7) где су вршена мерења.



Слика 4.7 Умирујући базен на ГФ моделу



Слика 4.8 Мере за контролу низводног граничног услова

Умирујући базен има дужину 250 cm што се показало довољно за формирање хидрауличког скока при усвојеним низводним дубинама. На излазу из умирујућег базена налазе се жлеб у дну и одговарајући рам на зидовима (слика 4.8), у које се постављају дрвене летве. Помоћу ових летви,

остварује се контрола низводног граничног услова, односно подешава се дубина доње воде на мерној инсталацији. Око умирујућег базена, на његовом самом почетку налази се и метални рам (слика 4.9) помоћу којег се поставља опрема за мерење брзине воде на уласку у умирујући базен.



Слика 4.9 Метални рам за постављање мерне опреме

4.1.2 Опис хидрауличког модела бране „Бузина“

У Заводу за хидраулику Института за водопривреду „Јарослав Черни“ урађена су хидрауличка моделска испитивања бране „Бузина“. Циљ ових моделских испитивања био је да се провери пројектно решење Енергопројект-Хидроинжењеринга за гравитациону бетонску брану „Бузина“ на истоименој реци у Алжиру, као и да се испита утицај нивоа доње воде на хидродинамичке притиске у умирујућем базену за усвојену диспозицију главног евакуационог објеката.

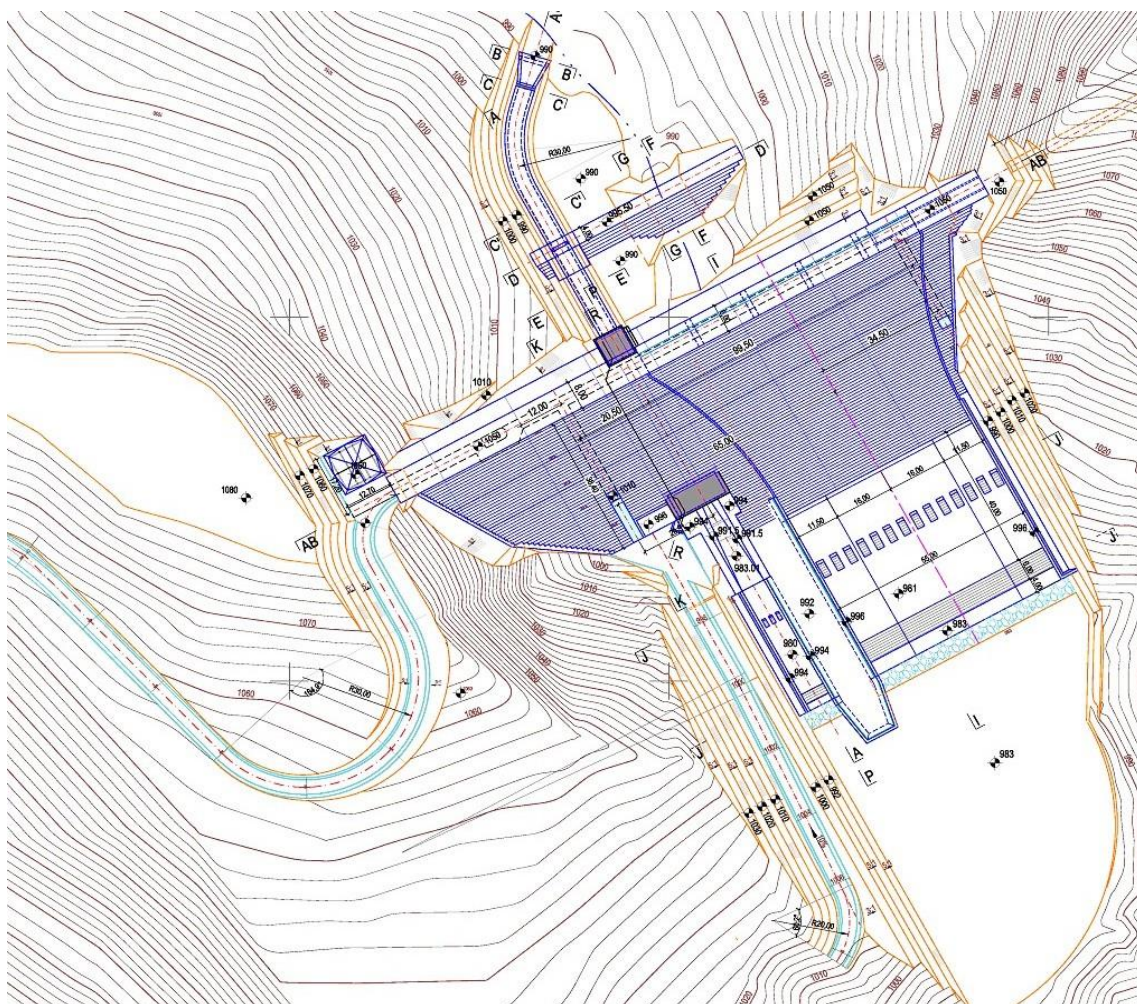
Брана „Бузина“ је гравитациона бетонска брана од ваљаног (RCC) бетона, са котом круне на 1050,0 m над морем. Брана формира акумулацију са котом нормалног успора на 1045,00 m над морем. Предвиђена грађевинска висина бране износи 76,50 m на непреливном делу, а најнижа кота темељења је на 973,50 m над морем. Ширина круне бране у износи 8,00 m, док је дужина круне бране 176,60 m. Узводно лице бране је вертикално, док је низводно лице у нагибу 1:0,89.

За евакуацију великих вода током експлоатације предвиђен је прелив практичног профила, степенести брзоток и умирујући базен.

Меродавна рачунска вода за димензионисање евакуационих грађевина је повратног периода од 1000 година и износи $Q_{0,1\%} = 1320 \text{ m}^3/\text{s}$.

Пројектом је предвиђен слободни чеони прелив практичног профила (Кригеров прелив). Кота круне прелива је на 1045 m над морем. Прелив се састоји од пет преливних поља подељени бетонским стубовима. Ширина сваког поља износи 15,00 m, па је укупна ширина преливне ивице 75,00 m. Разделни бетонски стубови су ширине 1,50 m. Висина преливног млаза при меродавном рачунском протоку је 4,00 m.

На низводном лицу бране налази се непризматични степенести брзоток. Подужни нагиб дна брзотока износи 1:0,89. Ширина на улазу у брзоток је 81,00 m, а излазна ширина износи 55,00 m. Непосредно после прелива налазе се шест мањих степеника висине 0,45 m, док су висине осталих степеника 0,90 m.

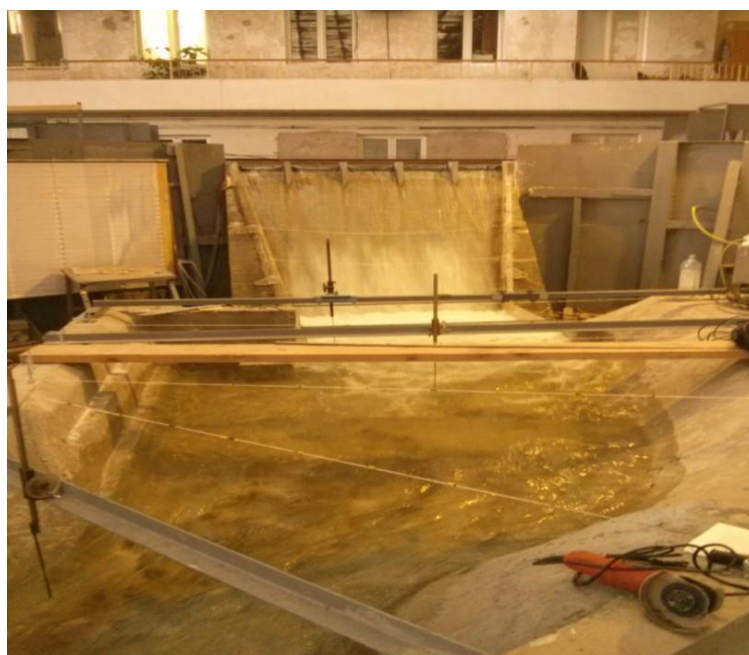


Слика 4.10 Диспозиција бране „Бузина“, [14]

У наставку степенастог брзотока, као објекат за умирење воде, пројектован је бетонски умирујући базен. Плоча умирујућег базена је анкерована за стенску подлогу. Испод плоче налази се дренажа. Ширина умирујућег базена износи 55,00 m, а његова дужина је 50,00 m. Кота дна умирујућег базена је на 981,00 m над морем. Меравна кота доње воде за димензионисање при рачунском протоку износи 994,50 m над морем. (слика 4.10).

Хидраулички модел бране обухвата област у којој се јавља само течење са слободном површином [14]. Код отворених токова постоје силе трења, гравитације и инерцијалне фиктивне силе, па сличност појава у односу на природу подлеже Фрудовом закону. Према овом закону, однос инерцијалних и гравитационих сила на моделу и у природи је исти, што значи да Фрудов број мора бити исти у природи и на моделу.

За хидрауличка моделска испитивања степенастих брзотока предлаже се размера за дужине од 1:10, како би се успешно моделирало течење мешавине воде и ваздуха. У овом случају, с обзиром на техничке могућности лабораторије, то би изискивало димензије парцијалног модела на коме не може да се испита течење на непризматичном брзотку. Због тога је изабран модел са пуном геометријском сличношћу, и усвојена размера за дужине 1:40 (Слика 4.11),[14].



Слика 4.11 Хидраулички модел бране „Бузина“, [14]

Да би се добила размера свих физичких величина на моделу спроведена је димензиона анализа [14].

Како је:
$$Fr_p = Fr_m \quad (4.1)$$

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot L}} \quad (4.2)$$

из претходних израза произилази да важи:

$$\frac{v_p}{\sqrt{g \cdot L_p}} = \frac{v_m}{\sqrt{g \cdot L_m}} \quad (4.3)$$

Ако се усвоји да је размера за дужине L :

$$\frac{1}{L} = \frac{L_m}{L_p} \quad (4.4)$$

према изразу (4.3) се добија размера за брзине:

$$\frac{v_p}{v_m} = \sqrt{\frac{L_p}{L_m}} = \sqrt{L} \quad (4.5)$$

и размера за протицај:

$$\frac{Q_p}{Q_m} = \frac{L_p^2 \cdot v_p^2}{L_m^2 \cdot v_m^2} = \left(\frac{L_p}{L_m}\right)^2 \cdot \left(\frac{v_p}{v_m}\right)^2 = L^2 \cdot \sqrt{L} = \sqrt{L^5} \quad (4.6)$$

Размера за време је:

$$\frac{t_p}{t_m} = \frac{L_p/v_p}{L_m/v_m} = \frac{L_p}{L_m} \cdot \frac{v_m}{v_p} = \frac{L}{\sqrt{L}} = \sqrt{L} \quad (4.7)$$

а за фреквенцију:

$$\frac{f_p}{f_m} = \frac{1/t_p}{1/t_m} = \frac{t_m}{t_p} = \frac{1}{\sqrt{L}} \quad (4.8)$$

Размера за силе је:

$$\frac{F_p}{F_m} = \frac{L_p^3 \cdot (\rho \cdot g)_p}{L_m^3 \cdot (\rho \cdot g)_m} = \left(\frac{L_p}{L_m}\right)^3 \cdot 1 = L^3 \quad (4.9)$$

Размера за моменте је:

$$\frac{F_p}{F_m} = \frac{L_p^3 \cdot (\rho \cdot g)_p \cdot L_p}{L_m^3 \cdot (\rho \cdot g)_m \cdot L_m} = \left(\frac{L_p}{L_m} \right)^4 \cdot 1 = A^4 \quad (4.9)$$

док је размера за притиске:

$$\frac{p_p}{p_m} = \frac{F_p / L_p^2}{F_m / L_m^2} = \frac{F_p}{F_m} \cdot \left(\frac{L_m}{L_p} \right)^2 = A^3 \cdot \frac{1}{A^2} = A \quad (4.10)$$

Размере на моделу приказане су у табели 4.1.

Табела 4.1 Размере на хидрауличком моделу бране „Бузина“

Физичка величина	јединица	Фактор размере	
Дужина	[m]	A	40
Брзина	[m/s]	$A^{1/2}$	6,32
Проток	[m ³ /s]	$A^{5/2}$	10119
Време	[s]	$A^{1/2}$	6,32
Фреквенција	[Hz]	$A^{-1/2}$	0,158
Сила	[kN]	A^3	64000
Моменти	[kNm]	A^4	2560000
Притисак	[Pa]	A	40

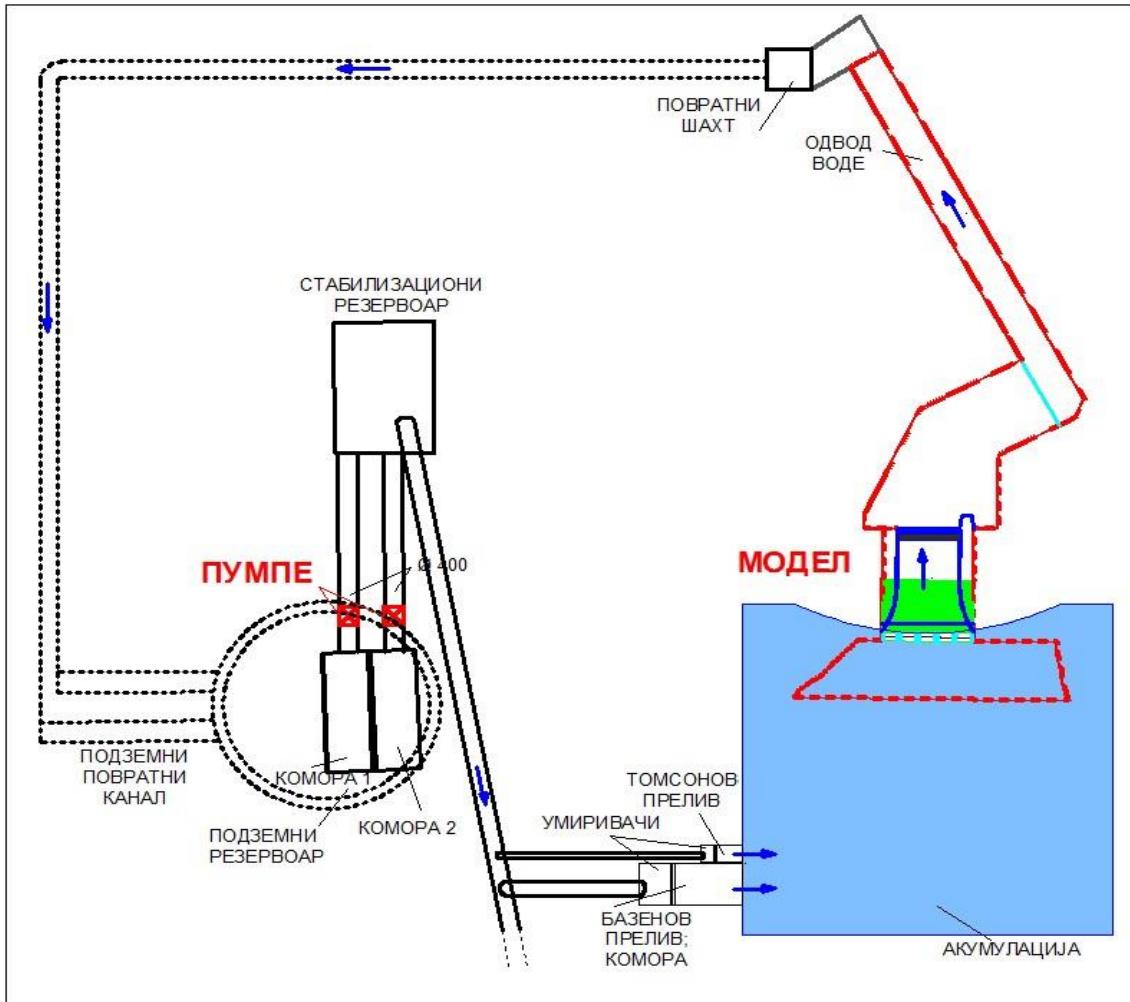
Модел обухвата део акумулационог језера у дужини од 60,00 m узводно од бране (1,5 m на моделу), брану у целој дужини, главни објекат за евакуацију великих вода, као и низводну деоницу дужине 190,00 m (4,75 m на моделу) [14].

Разматрани део акумулације смештен је у унутрашњост металног резервоара димензија 8,02 x 8,20 m у основи, висине 185 cm у узводном делу и 80 cm у низводном делу. Како би се на модел пренела стварна топографија терена, према расположивим профилима, простор између зидова се насипа песком преко кога се поставља цементна кошуљица, дебљине 2 ÷ 4 cm, и хидроизолација, дебљине 1 cm. На овај начин се моделира и деоница речног корита низводно од слапишта.

Брана, прелив и брзоток израђени су од ситнозрног бетона, док су дно и зидови слапишта израђени од плексигласа, на металној конструкцији, [14].

Модел бране „Бузина“ се снабдева водом преко рециркулационог система Хидрауличке лабораторије. Контрола протока, који долази на модел обавља се преко две мерне коморе (слика 4.14).

Нивои воде на коморама мере се мерним иглама са нонијусом, тачности мерења $\pm 1/10$ mm. На тај начин постиже се тачност одређивања протицаја од $\pm 0,5$ %.



Слика 4.14 Схематски приказ инсталације за модел бране „Бузина“, [14]

Вода се из мерних комора преко стабилизационог резервоара доводи до узводног дела модела. Стабилизациони резервоар је запремине $3,50 \text{ m}^3$ и у њему се налазе средства за умирење (жичани јастук, саргија, површински умиривач таласа и решеткасти дрвени умиривач), помоћу којих се на моделу постиже добро умирење воде на узводном крају акумулације, чиме се опонашају услови течења у природи.

Вода која се евакуише из слапишта и низводног дела корита одводи се у подземни резервоар, одакле се пумпама убацује у стабилизациони резервоар, а одатле цевоводима до поменутих мерних комора и поново до модела. Ово је циклус који се понавља.

Устаљеност протока на моделу обезбеђује систем за снабдевање водом Хидрауличке лабораторије.

4.2 Мерења на моделу

У току истраживања вршена су мерења различитих физичких величина како на ГФ моделу, тако и на моделу бране "Бузина". Мерења су вршена углавном истом мерном техником уз неке мање специфичности.

4.2.1 Мерење протока

Протицај воде на ГФ моделу се мери на Томсоновим преливима (контролни пресек) пре уласка у експерименталну инсталацију, а израчунава се према формули Конеа:

$$Q = 1000 \cdot 0,303 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_p^{2,48}} \quad (4.11)$$

где је: Q [l/s] – проток преко прелива, а h_p [m] – висина преливног млаза, која се одређује на основу мерења нивоа воде у резервоару.

Ниво воде у резервоару се мери помоћу мерне игле. Како су преливи на различитим висинама, важи да је:

$$h_{p1} = 44,57 - \psi_{IG} \quad [\text{cm}] \quad (4.12)$$

$$h_{p2} = 44,36 - \psi_{IG} \quad [\text{cm}] \quad (4.13)$$

где је: ψ_{IG} [cm] – ниво воде у резервоару, одређен читавањем положаја мерне игле.

Укупан проток се одређује као збир протока на оба прелива:

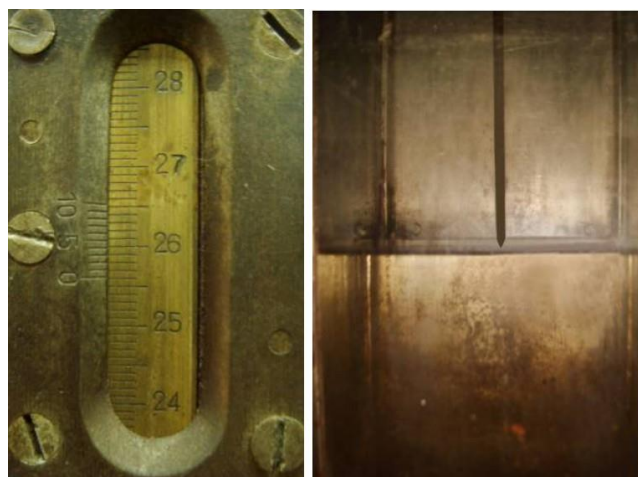
$$Q = Q_1 + Q_2 \quad (4.14)$$

при чему су Q_1 и Q_2 протоци на првом, односно другом Томсоновом преливу.

Мерна игла за одређивање нивоа у резервоару (слика 4.15) је тачности 0,1 mm. Тачност одређивања протока зависи од опсега у коме се

мери, а са повећањем протока се повећава и апсолутна грешка. При максималном протоку од 60 l/s, апсолутна грешка при мерењу износи 0,07 l/s, док је релативна грешка 0,12 %, [19].

Тачност мерења више зависи од могућности постављања игле у одређени положај, него од тачности мерног инструмента, јер је у пракси скоро немогуће да се са тачношћу $\pm 1/10$ mm игла постави у положај при коме додирује површину воде. Дакле, може се сматрати да је тачност мерења нивоа воде 0,5 mm, па је максимална грешка при одређивању протока 0,35 l/s, односно 0,58 %, [19]. Током моделских испитивања на ГФ моделу кроз ексерименталну инсталацију су пропуштани протицаји од 20 до 60 l/s.



Слика 4.15 Мерење нивоа воде у резервоару са Томсоновим преливом, [19]



Слика 4.16 Ултразвучни мерач протицаја Dynasonics TFXL

Проток на моделу је такође мерен и на доводној цеви испред резервоара у оквиру мерне инсталације. Мерење је вршено помоћу ултразвучног мерача протицаја „Dynasonics TFXL“ (слика 4.16). Прецизност мерења протицаја на овом мерном уређају је $\pm 1\%$.

Проток на хидрауличком моделу бране „Бузина“ је мерен у мерним коморама са Базеновим и Томсоновим преливима. И овде је за мерење висине приливног млаза коришћена мерна игла са нонијусом, чија је тачност мерења $\pm 1/10$ mm, па је тачност мерења протока $\pm 0,5\%$. Проток на хидрауличком моделу бране мерен је и ултразвучним уређајем за континуално мерење протицаја, произвођача „Е&Н“, са тачношћу мерења од $\pm 1,5\%$. Континуално мерење се обезбеђује аквизиционим модулом НВМ Spider8.

4.2.2 Мерење нивоа воде у резервоару

Ниво воде у резервоару, како на ГФ моделу, тако и на хидрауличком моделу бране „Бузина“, мери се помоћу мерног лењира и пијезометарске цеви изведене из резервоара и постављене са његове предње стране (слика 4.17).



Слика 4.17 Лењир и пијезометарска цев на резервоару мерне инсталације [19]

Помоћу нивоа воде у резервоару добија се висина преливног млаза на преливу практичног профила. Протицај и висина преливног млаза на преливу практичног профила повезани су изразом:

$$Q = C_p \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_p^3} \quad (4.15)$$

где је C_p одговарајући коефицијент преливања. Може се сматрати да је на овај начин висина преливног млаза одређена са прецизношћу од $\pm 0,1$ cm.

4.2.3 Мерење дубине воде у умирујућем базену

Мерење дубине воде у умирујућем базену има за циљ одређивање линије нивоа у умирујућем базену. Ово мерење је на ГФ моделу вршено помоћу мерних лењира од транспарентне фолије, залепљених на зид од провидног плексигаса (слика 4.18). Иако је прецизност ових мерних лењира $\pm 0,1$ cm, због великих осцилација нивоа, готово је немогуће читавање са прецизношћу већом од ± 1 cm, нарочито у зони хидрауличког скока. Како су очекиване вредности притисака на моделу око 10 - 40 cm, управо коришћење мерних лењира као изразито непрецизно намеће да тачност резултата мерења и обраде не треба сматрати већим од 5 - 10%.



Слика 4.18 Мерни лењира за мерење дубине воде у умирујућем базену

На хидрауличком моделу бране „Бузина“ одређивање дубине воде у умирујућем базену вршено је мерењем висине воденог стуба у стакленим пијезометарским цевима. Распоред пијезометара изабран је тако да се њиховим читавањем може стећи комплетна слика о линији нивоа. За мерење нивоа воде у пијезометарским цевима користи се подлога са милиметарским растером, која даје тачност мерења $\pm 0,05$ cm.

4.2.4 Мерење динамичких притисака

Мерење динамичких притисака на ГФ моделу рађено је на већем броју мерних места ($24 \div 42$), зависно од диспозиције мерне инсталације. Мерења су вршена на дну и на десном зиду умирујућег базена. За мерење притисака употребљени су давачи притиска сонде (произвођача „DRUCK“), са тачношћу $\pm 0,1$ % (слика 4.19).



Слика 4.19 Сонда за мерење динамичких притисака [14]

За синхрону аквизицију података (до 19200 Hz) користе се аквизициони модули „НВМ Quantumx“ (слика 4.20).

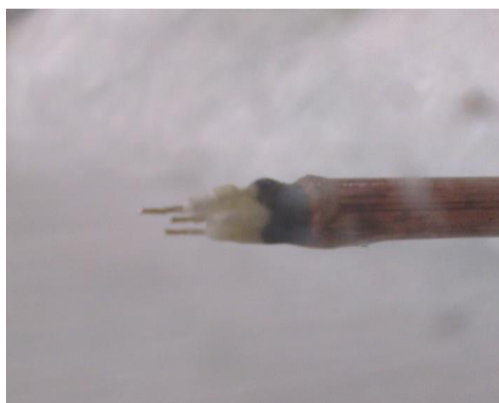


Слика 4.20 Аквизициони модул НВМ Quantumx, [20]

Динамички притисци на хидрауличком моделу бране „Бузина“ мерени су на 73 места у дну. Мерења су вршена истом мерном опремом као и на ГФ моделу.

4.2.5 Мерење брзина на почетку умирујућег базена

За потребе мерења брзина на почетку умирујућег базена (односно на крају степенастог брзотока) како код ГФ модела, тако и код хидрауличког модела бране „Бузина“, коришћен је сензор за мерење концентрације ваздуха у води и брзине двофазног флуида, [20].



Слика 4.21 Трострука сонда за мерење електропроводљивости, [20]

Сензор мери електропроводност са три електроде (слика 4.21), једне предње и две задње. Позиционирање сензора спроводи се преко мерне игле за мерење нивоа тачности $\pm 1/10$ mm, [20].

4.3 Обим моделских испитивања

На ГФ моделу умирујућег базена - слапишта извршено је укупно 102, а на моделу бране „Бузина“ 4 експеримента. На ГФ моделу разматране су:

1. Две различите висине степеника у брзотоку,
2. Четири различита степена сужења брзотока,
3. Три различита протока,
4. Четири до пет различитих дубина доње воде.

док је на хидрауличком моделу Бране „Бузина“ посматрана једна диспозиција за 4 различите дубине доње воде.

На ГФ моделу је усвојено следеће означавање експеримената:

$$\text{ГФ ("}\theta\text{" ("C") Q("}q_1\text{"}) h("}h_1\text{"})$$

где су:

" θ " ознака за сужење на брзотоку:

0 - ако нема сужења, односно за призматични брзоток,

1 - за брзоток са малим сужењем, $\theta = 5^\circ$

2 - за брзоток са средњим сужењем, $\theta = 10^\circ$

3 - за брзоток са великим сужењем, $\theta = 15^\circ$.

"C" ознака за величину степеника на брзотоку:

M - за мањи степеник,

V - за већи степеник,

" q_1 " проток.

" h_1 " дубина доње воде, односно низводни гранични услов.

За сваки експеримент на ГФ моделу одређена су два мерна места за мерење протока, једно мерно место за мерење нивоа, 7 мерних места за мерење дубине воде и $18 \div 35$ мерних места за мерење притисака у

умирујућем базену. Поред ових планских мерења, обављена су и мерења у циљу контроле претпостављене симетрије проблема.

На хидрауличком моделу бране „Бузина“ постојала су два мерна места за мерење протока, једно мерно место за мерење нивоа, 19 мерних места за мерење дубине воде и 91 мерно место за мерење притисака у умирујућем базену, распоређених на 4 плоче. За сваку плочу, узорковање је вршено посебно.

4.4 Димензиона анализа

Утицаји који се јављају у умирујућем базену зависе од великог броја величина. Једне се односе на геометријске карактеристике разматраног проблема, друге на услове течења, а треће на физичке особине флуида.

Геометријски услови су дати преко висине степеника у брзотоку h_c , као и угла сужења брзотока θ . Услови течења у базену су дефинисани, дубином и брзином у суженом пресеку, h_1 и v_1 и дубином доње воде $h_{дв}$, односно одговарајућом потоцњеношћу хидрауличког скока, $\Omega_{и}$. Величине које карактеришу физичке особине флуида су густина воде, ρ_w , динамичка вискозност воде, μ_w , модул стишљивости воде, E_w , и површински напон између воде и ваздуха, τ_w . Поред тога, у анализу је уврштено и гравитационо убрзање, g .

Када се све наведене величине узму у разматрање, добије се да хидродинамички утицаји у умирујућем базену зависе од следећих димензионалних величина:

$$Y = f(h_c, \theta, h_1, v_1, \Omega_c, \rho_w, \mu_w, E_w, \tau_w, g), \quad (4.16)$$

где је променљивом Y симболички представљен утицај (сила или моменат) на неки од конструктивних елемената.

При проучавању одређене појаве, погодна је прећи са димензионалних величина на бездимензионалне величине. Поступком свођења димензионалних величина на бездимензионални облик, смањује се број независно променљивих величина и омогућава једноставнија анализа, на основу које се добијају резултати и закључци такође у бездимензионалном облику, погодном за примену.

Поред услова да основне величине морају да буду међусобно независне, оне такође морају да буду и свеобухватне, да би се преко њих омогућило изражавање свих изведених величина.

Систем основних величина чине три међусобно независне и свеобухватне величине, којима се у потпуности описује струјање:

дубина, h_1 , којом се дефинишу геометријске карактеристике проблема,

брзина, v_1 , као показатељ кинематичности, који у анализу уводи и време,

густина ρ_w , као показатељ инертности, преко кога се у анализу уводи маса.

Једначина (4.16) у којој са десне стране једначине фигурише 10 димензионалних величина, се применом Бакингамове П–теореме, своди на једначину са $10 - 3 = 7$ бездимензионалних величина (4.17).

$$Y' = \frac{Y}{\varphi(h_1, v_1, \rho_w)} = f\left(\frac{h_c}{h_1}, \theta, \Omega_c, \frac{\mu_w}{h_1 \cdot v_1}, \frac{E_w}{v_1^2 \cdot \rho_w}, \frac{\tau_w}{h_1 \cdot v_1^2 \cdot \rho_w}, \frac{g \cdot h_1}{v_1^2}\right) \quad (4.17)$$

где је Y' - бездимензионални утицај изведен од величине Y .

У претходној једначини се уочавају реципрочне вредности неких стандардних бездимензионалних бројева, који се примењују у механици флуида:

- Рејнолдсов број: $Re_1 = \frac{h_1 \cdot v_1 \cdot \rho_w}{\mu_w}$

- Кошијев број: $Ca_1 = \frac{v_1^2 \cdot \rho_w}{E_w}$

- Веберов број: $We_1 = \frac{h_1 \cdot v_1^2 \cdot \rho_w}{\tau_w}$

- Фрудов број: $Fr_1 = \frac{g \cdot h_1}{v_1^2}$

Уврштавањем бездимензионалних бројева у једначину (4.17) добија се:

$$Y' = f\left(\frac{h_c}{h_1}, \theta, \Omega_c, Re_1, Ca_1, We_1, Fr_1\right) \quad (4.18)$$

Поменути бездимензионални бројеви немају исти утицај на разматрану појаву, јер се сваким од њих описују различите карактеристике тока.

Рејнолдсов број описује утицај вискозности флуида, јер је реч о односу инерцијалних и вискозних сила. Његов утицај на струјну слику је занемарљив у случају струјања са изразито развијеном турбуленцијом, какво је унутар умирујућег базена, али слично Веберовом броју може имати утицај наувлачење вадуха, [20].

Кошијев број представља утицај стишљивости флуида на течење. С обзиром да је стишљивост воде практично занемарљива (нарочито у случају течења са слободном површином), утицај Кошијевог броја се неће даље разматрати.

Веберов број представља утицај површинског напона на течење, који није занемарљив када се анализира увлачење ваздуха у изразито турбулентни ток на степенастом брзотоку и у умирујућем базену. С обзиром на расположиву мерну опрему, није било могуће одредити увлачење и течење ваздуха, без значајног нарушавања тачности резултата мерења притисака. Уз то, сматрало се да, с обзиром на мале концентрације ваздуха уз контуру, присуство ваздуха у току неће имати битног утицаја на вредности притиска (а тиме и сила и момената) на дно и зидове базена. Стога је у даљем разматрању избегнуто експлицитно присуство Рејнолдсовог и Веберовог броја.

Фрудов број представља утицај гравитације на течење, јер је реч о односу инерцијалних и гравитационих сила. Утицај Фрудовог броја је доминантан када сила гравитације утиче на кретања флуида, што је случај код отворених токова какав се овде анализиран. Фрудов број ће се разматрати у наставку, као најважнија бездимензионална величина, која описује хидраулички скок.

Бездимензионалне величине могу да се коренују и степенују или да се међусобно множе и деле, као и да се множе и деле другим бездимензионалним величинама, уколико се на тај начин олакшава даљи рад.

У складу са анализом утицаја бездимензионалних бројева на разматрану појаву, једначина (4.18) се своди на облик:

$$y' = f\left(\frac{h_c}{h_1}, \theta, \Omega_c, Fr_1\right) \quad (4.19)$$

Вредност првог члана једначине на десној страни репрезентује релативну "храпавост" брзотока, χ_p . Претходна једначина се тако своди на коначан облик:

$$y' = f(\chi_p, \theta, \Omega_c, Fr_1) \quad (4.20)$$

Први и други и четврти члан описују течење на брзотоку, односно представљају узводне граничне услове, а трећи члан описује доњу воду односно низводни гранични услов.

4.5 План узорковања на моделу

Комплексност истраживања на ГФ моделу захтевала је детаљну припрему и организацију. У циљу оптимизације истраживања анализирани су резултати мерења на моделу бране „Бузина“, како би се извршио избор:

1. трајања узорковања,
2. фреквенце узорковања,
3. броја места на којима се врши узорковање.

4.5.1 Величине које се узоркују

За процену карактеристика хидродинамичког оптерећења у слапишту примењен је стандардни поступак анализе, детаљно приказан у литератури [6].

Тренутна вредност притиска у некој тачки, p , може се приказати као збир средње вредности притиска, \bar{p} , и његове пулзације, p' :

$$p = \bar{p} + p' . \quad (4.21)$$

Средња вредност притиска дефинише се као:

$$\bar{p} = \frac{1}{T} \int_0^T p \cdot dt , \quad (4.22)$$

где је T укупно време узорковања.

Показатељ развијености пулзација је средње квадратно одступање, σ , које је одређено као:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (p - \bar{p})^2 \cdot dt}, \quad (4.23)$$

и представља квадратни корен из варијансе:

$$\sigma = \sqrt{p'^2} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p'^2 \cdot dt}. \quad (4.24)$$

За практичне потребе, најважније су највећа и најмања вредност притиска. Бројна истраживања су показала да се функција густине вероватноће притисака може апроксимирати нормалном расподелом:

$$f_n\left(\frac{p}{\sigma}\right) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^{p/\sigma} e^{-\frac{1}{2} \frac{p^2}{\sigma^2}} \cdot d\left(\frac{p}{\sigma}\right). \quad (4.25)$$

Са усвојеном нормалном расподелом, максималне и минималне вредности пулзације притиска могу се дефинисати као:

$$p'_{\max} = -p'_{\min} = k \cdot \sqrt{p'^2}, \quad (4.26)$$

где је k коефицијент који зависи од вероватноће појаве. Обично се усваја: $k = 3,2$ за притисак вероватноће појаве 99,9 %, што значи да ће овако добијени притисак бити превазиђен само у 0,1 % времена.

4.5.2 Трајања и фреквенца узорковања

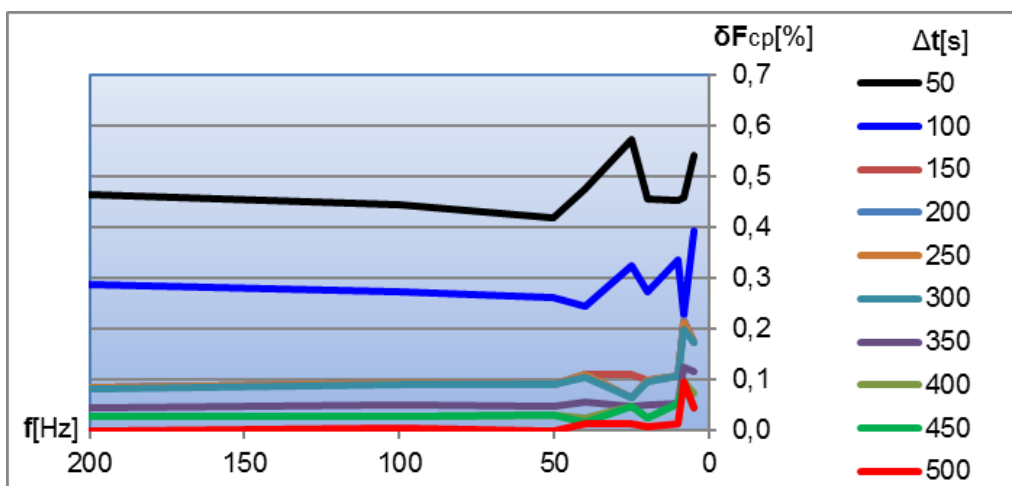
У првој фази истраживања, на Моделу „Бузина“, мерења у свим експериментима су трајала по $\Delta t_0 = 500$ s, док је учесталост узорковања износила $f_0 = 200$ Hz. Ово је био преобиман узорак за генерисање великог броја низова података за анализу.

Зато су извршене модификације узорковања тако што је скраћивано трајање ($\Delta t < \Delta t_0$) и редукована учесталости узорковања ($f < f_0$). На основу тако добијених података одређени су одговарајући хидродинамички утицаји: укупна сила од средњих притисака, F_{cp} , и укупна пулзациона сила, F_{σ} .

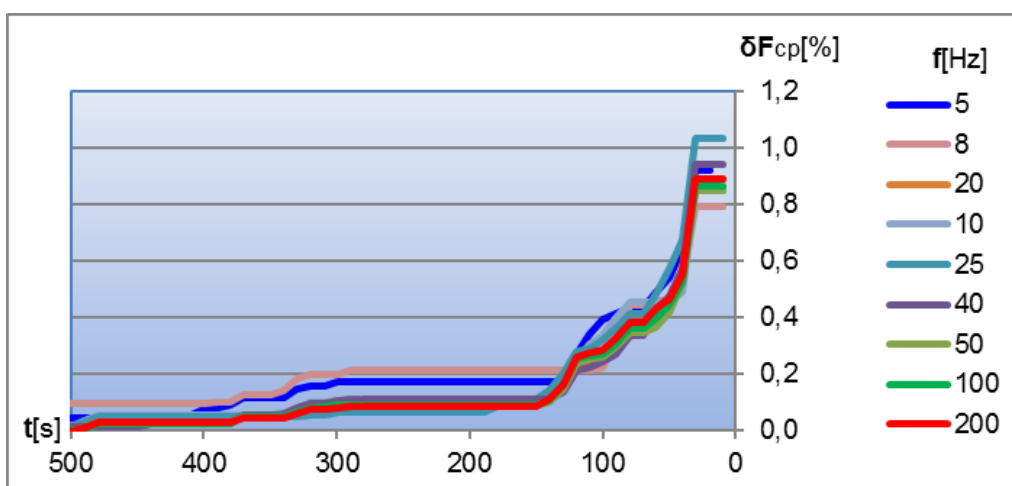
Ови утицаји су упоређивани са одговарајућим вредностима $F_{cp}(\Delta t_0, f_0)$ и $F_{\sigma}(\Delta t_0, f_0)$ добијених на комплетним низовима података, тако што су одређена релативна одступања:

$$\delta F_{cp}(\Delta t, f) = \frac{|F_{cp}(\Delta t_0, f_0) - F_{cp}(\Delta t, f)|}{F_{cp}(\Delta t_0, f_0)}, \quad (4.27)$$

$$\delta F_{\sigma}(\Delta t, f) = \frac{|F_{\sigma}(\Delta t_0, f_0) - F_{\sigma}(\Delta t, f)|}{F_{\sigma}(\Delta t_0, f_0)}. \quad (4.28)$$

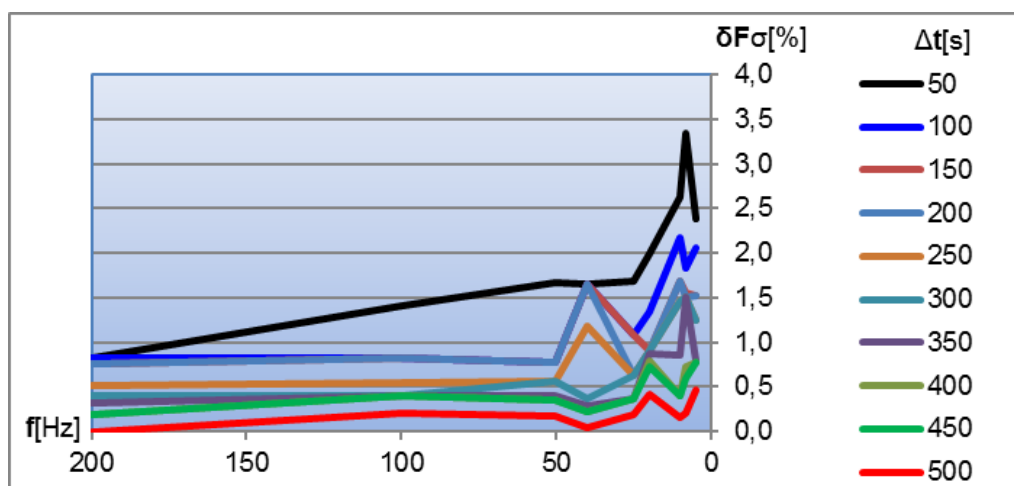
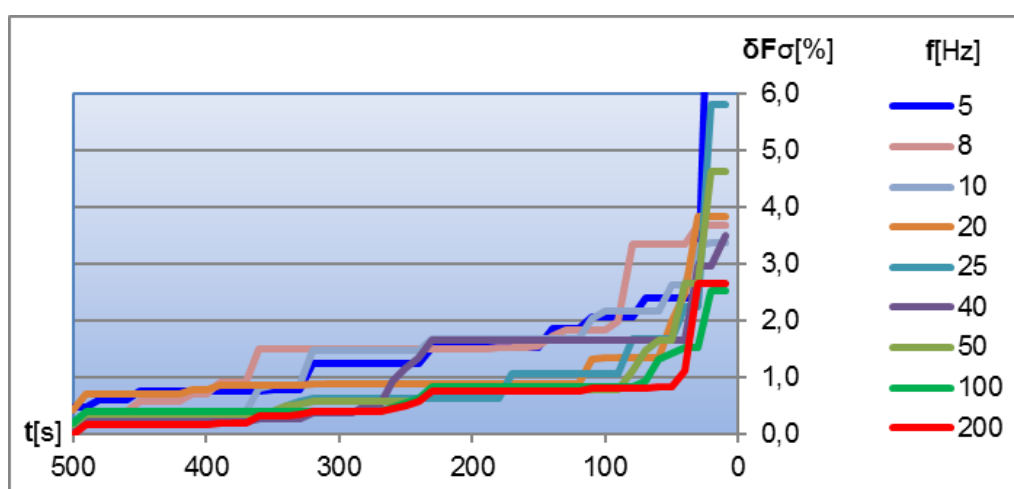


Слика 4.22 $\delta F_{cp}(f)$, са параметром Δt



Слика 4.23 $\delta F_{cp}(\Delta t)$, са параметром f

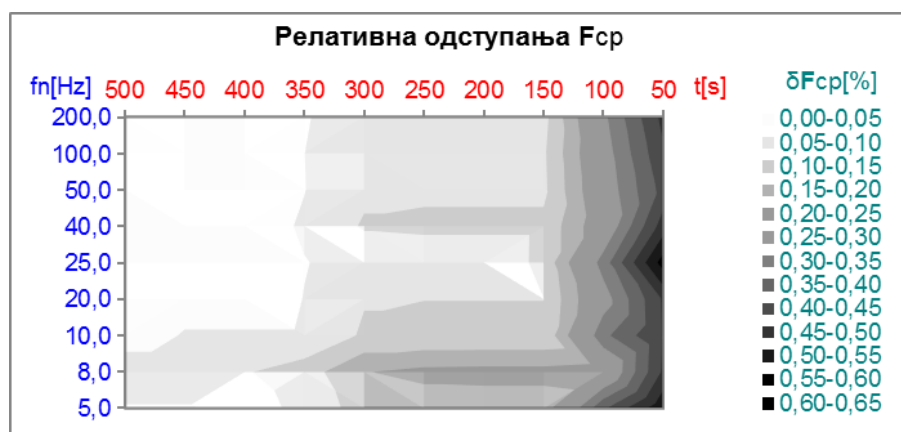
На сликама 4.22 и 4.23 може да се приметити како су сва одступања вредности силе услед деловања средњих притисака у границама тачности за мерну инсталацију ($\pm 1\%$).

Слика 4.24 $\delta F_\sigma(f)$, са параметром Δt Слика 4.25 $\delta F_\sigma(\Delta t)$, са параметром f

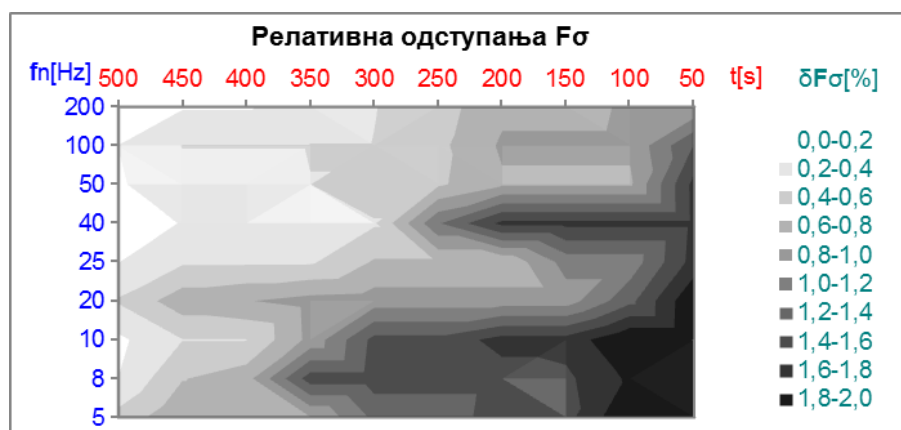
Са слика 4.24 и 4.25 може се видети да се одступања силе услед пулзација налазе у границама тачности мерне инсталације у пољу узорковања за фреквенце веће од 50 Hz, и трајања дужа од 150 s.

Већа осетљивост, добијена у случају анализе сила услед пулзација, је очекивана, јер су оне за ред величине мање него одговарајуће силе од средњих притисака, док су мерна опрема, техника мерења и тачност поступка исти.

На основу предходног, закључено је да ће се најзахтевнији услови (по питању трајања и учесталости узорковања) добити за експерименте мерења код којих се очекују најмање вредности хидродинамичких утицаја.

Слика 4.26 Релативна одступања силе F_{cp} у "простору мерења"

Резултати обављене анализе се најбоље могу сагледати приказивањем релативних одступања резултујућих сила и нормалности њихове расподеле у "простору мерења", где се вредности релативног одступања силе δF_{cp} , као висинска кота, везују за араметарске парове, трајање и фреквенца (t, fn), као одговарајуће тачке у равни параметарског домена.

Слика 4.27 Релативна одступања силе F_{σ} у "простору мерења"

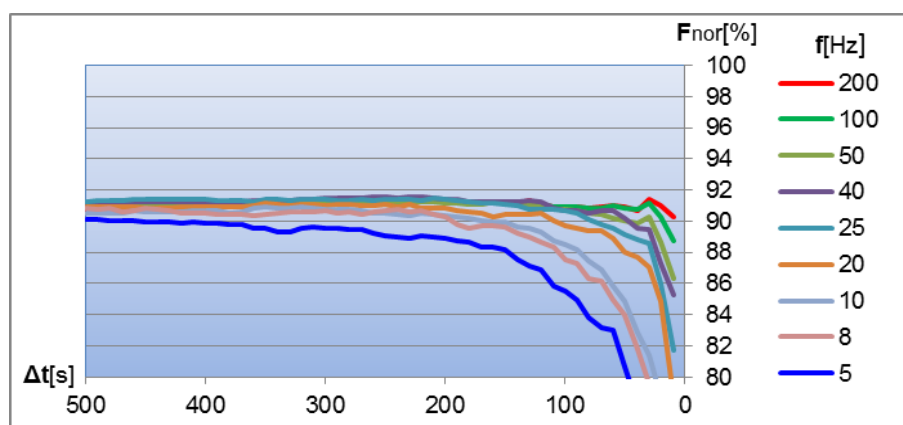
На основу расподеле релативних одступања, како силе од средњих притисака (слика 4.26), тако и силе од пулзација (слика 4.27), могу се уочити учесталости код којих оне изразито расту. Ове учесталости су карактеристичне за сваку диспозицију мерења и у спроведеној анализи све су ниже од 100 Hz.

4.5.3 Статистичка расподела узоркованих података

Такође, посматран је и услов "нормалности" расподеле модификованих низова, $N_{\%}(\Delta t, f)$, у циљу провере оправданости

прорачунске претпоставке. Нормалност расподеле је квантификована процентом слагања података у 20 класа (подинтервала) домена мерења, са теоријским вредностима добијеним према изразу (4.25).

При анализи нормалности расподеле података у редукованим низовима, уочава се да она пре свега зависи од броја података $n = \Delta t \cdot f$ и да се добро слаже са теоријским вредностима за густину нормалне расподеле (слика 4.28).



Слика 4.28 Слагање расподеле података са нормалном

По питању нормалности расподеле узоркованих података, може се уочити да је на највећем делу простора мерења, слагање са нормалном расподелом веће од 90 %.



Слика 4.29 Слагање расподеле измерених вредности са нормалном расподелом у "простору мерења"

Такође се може приметити како се нормалност расподеле значајно нарушава тек када број података мерења падне испод 1000. Дакле, по овом

критеријуму нема опасности да буду нарушене претпоставке прорачуна хидродинамичких сила.

На основу анализе резултата добијених са модификованим нивовима мерних података може се закључити да:

1. Сила од средњих притисака није осетљива на смањење броја података у мерном низу, како на скраћивање трајања, тако и смањење учесталости узорковања.
2. Сила од пулзација не може се прецизно одредити ако су интервали мерења краћи од 120 s и учесталости мање од 50 Hz .
3. За одређене учесталости узорковања, које су карактеристика за одређену диспозицију мерења, постоје знатна расипања добијених резултата.
4. Слагање расподеле података у модификованим нивовима са теоријском нормалном расподелом је прихватљиво за све нивове који имају више од 1000 мерних вредности.

Ако се као циљ анализе постави усвајање трајања и учесталости узорковања које неће давати релативно одступање резултата веће од тачности мерне инсталације, могуће је значајно смањење, простора за складиштење података, трајање мерења и обраде резултата.

Ипак, због могућности да се при одређеним учесталостима узорковања мањим од 100 Hz појави значајна непрецизност при одређивању одговарајућих хидродинамичких утицаја, не препоручује се редукција броја мерних података по овом критеријуму, односно смањење учесталости узорковања испод 200 Hz.

4.6 Обрада података добијених мерењем

На физичком моделу вршено је узорковање притисака у дну и на зидовима. За сваку од диспозиција модела постојала је одговарајућа мерна мрежа, дефинисана положајем мерних сонди и бочних лењира за мерење дубине воде. Како се није располагало адекватним мерним сензорима за синхронно праћење дубина на месту узорковања притисака, резултати су добијени под претпоставком да у попречном пресеку базена нема значајне варијације у дубине воде, тј. ниво је хоризонталан.

Ова претпоставка је контролисана на основу добијених притисака, тако што је одређиван коефицијент утицаја попречне и подужне интерполације за свако мерно место које у подужном и попречном пресеку има постављену најмање по још једну мерну сонду са обе стране. Таква мерна места су названа "унутрашња". Уколико је коефицијент утицаја попречне интерполације на свим унутрашњим мерним местима био већи од 90%, претпоставка о малој варијацији дубина по попречним пресецима се могла сматрати испуњеном. У том случају се на основу измерених притисака могла добити слика хидродинамичког оптерећења.

За узорковане притиске на мерним сондама одређена је средња вредност притиска:

$$p_{cp} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_n} p(t) \cdot dt = \frac{\sum_i p_i}{n_i} \quad (4.29)$$

и средња варијација, односно пулзација:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (p - p_{cp})^2 \cdot dt} \quad (4.30)$$

Утицаји од средњих притисака и пулзација су посматрани одвојено јер се први могу сматрати статичким, а други динамичким утицајима на објекат. За сваки од попречних пресека дуж базена се, на основу слике притисака и линије нивоа, која је усвојена као константна на целом попречном пресеку, може посматрати равнотежно стање, и добити процена утицаја од "скретања тока" у најузводнијем делу умирујућег базена, снажне турбуленције у зони хидрауличког скока и евентуалним неслагањима са учињеном претпоставком у зони низводно од хидрауличког скока.

Средњи притисци и пулзације су у свим разматрањима и анализама посматрани у бездимензионом облику:

$$p'_{cp} = \frac{p_{cp}}{E_0} \quad \text{и} \quad \sigma' = \frac{\sigma}{E_0}, \quad (4.31 \text{ и } 4.32)$$

где је за референтну вредност E_0 усвојена преостала енергија на низводном крају брзотока. Одређивање расподеле хидродинамичког оптерећења унутар базена није било примарни задатак овог истраживања, већ је

служило само у циљу одређивања хидродинамичких утицаја на главне конструктивне елементе умирујућег базена: плоче у дну и зидове.

Примарни утицаји који су разматрани у истраживању су били:

1. Средња вредност вертикалне силе на дно десне половине умирујућег базена, F_{cp} и њена пулзациона компонента, F_{σ} . Обе су приказане у бездимензионалном облику:

$$F'_{cp} = F_{cp} / F_{0,ДВ} \quad \text{и} \quad F'_{\sigma} = F_{\sigma} / F_{0,ДВ} \quad (4.33 \text{ и } 4.34)$$

где је $F_{0,ДВ}$ вертикална сила на исти део умирујућег базена, када је он потпуно испуњен у нивоу доње воде.

2. Средња, $F_{cp,y}$ и пулзациона $F_{\sigma,y}$ компонента вертикалне сила на дно десне, узводне четвртине умирујућег базена. Обе су приказане у бездимензионалном облику:

$$F'_{cp,y} = F_{cp,y} / F_{0y,ДВ} \quad \text{и} \quad F'_{\sigma,y} = F_{\sigma,y} / F_{0y,ДВ} \quad (4.35 \text{ и } 4.36)$$

где је $F_{0y,ДВ}$ вертикална сила на исти део умирујућег базена, када је он потпуно испуњен у нивоу доње воде.

3. Средња, $F_{cp,n}$ и пулзациона $F_{\sigma,n}$ компонента вертикалне силе на дно десне, низводне четвртине умирујућег базена. Обе су приказане у бездимензионалном облику:

$$F'_{cp,n} = F_{cp,n} / F_{0n,ДВ} \quad \text{и} \quad F'_{\sigma,n} = F_{\sigma,n} / F_{0n,ДВ} \quad (4.37 \text{ и } 4.38)$$

где је $F_{0n,ДВ}$ вертикална сила на исти део умирујућег базена, када је он потпуно испуњен у нивоу доње воде.

Ове силе су одређене на два начина: (а) на основу поступка професора Георгија Хајдина, [2], (б) статистичком анализом низа срачунатих тренутних утицаја током узорковања.

4. Хоризонтална сила и моменат у уклештењу дуж зида умирујућег базена, како од средњих притисака: $H_{cp,3}(X')$ и $M_{cp,3}(X')$, тако и од пулзација: $H_{\sigma,3}(X')$ и $M_{\sigma,3}(X')$. Сви ови утицаји су приказани у односу на одговарајуће утицаје, $H_{03,ДВ}$ и $M_{03,ДВ}$ када је умирујући базен попуњен доњом водом. ($X' = X/L_C$ је

бездимензиона подужна координата у умирујућем базену, где је L_C дужина умирујућег базена).

$$H'_{cp,3} = H_{cp,3} / H_{03,ДВ} \quad \text{и} \quad M'_{cp,3} = M_{cp,3} / M_{03,ДВ}, \quad (4.39 \text{ и } 4.40)$$

$$H'_{\sigma,3} = H_{\sigma,3} / H_{03,ДВ} \quad \text{и} \quad M'_{\sigma,3} = M_{\sigma,3} / M_{03,ДВ}. \quad (4.41 \text{ и } 4.42)$$

Такође, коришћено је више изведених параметара и величина за поређење и праћење наведених утицаја у умирујућем базену:

1. Слагање утицаја током узорковања са нормалном расподелом \mathcal{N} .
2. Параметри хидрауличког скока у умирујућем базену:

$$v_1 = \sqrt{2 \cdot g \cdot E_0}, \quad - \text{брзина тока у суженом пресеку}, \quad (4.43)$$

$$h_1 = \frac{Q}{v_1 \cdot B_C}, \quad - \text{прва спрегнута дубина}, \quad (4.44)$$

$$Fr_1 = \frac{v_1^2}{h_1 \cdot g}, \quad - \text{Фрудов број у суженом пресеку}, \quad (4.45)$$

$$h_2 = \frac{h_1}{2} \cdot (\sqrt{1 + 8 \cdot Fr_1} - 1), \quad - \text{друга спрегнута дубина}, \quad (4.46)$$

$$\Omega_P = \frac{h_{ДВ}}{h_2}, \quad - \text{теоријска потопљеност хидрауличког скока}, \quad (4.47)$$

$$\Omega_{II} = \frac{h_{II}}{h_2}, \quad - \text{потопљеност хидрауличког скока на крају,} \\ \text{умирујућег базена} \quad (4.48)$$

где су: B_C - ширина умирујућег базена, (4.49)

$$h_{ДВ} - \text{дубина воде на низводној граници модела}, \quad (4.50)$$

$$h_{II} - \text{дубина воде на крају базена, односно на:}$$

$$X_{II} = L_C = 5 \cdot h_2, \quad (4.51)$$

од почетка умирујућег базена.

3. Доминантне фреквенце при којој се (евентуално) јавља амплификација хидродинамичких утицаја.

За димензионисање плоча умирујућег базена најчешће је меродаван критеријум стабилности против испливавања, где се тежина плоче и притисак воде из умирујућег базена, супротстављају узгону од потиска и филтрације. Узгон од потиска је одређен дужином доње воде и на посматрану плочу умирујућег базена делује приближно силом $F_{0,ДВ}$, која је усвојена као референтна у анализи вертикалних утицаја. На овај начин добијени резултати за вертикалне утицаје, представљају:

$$F'_{cp} = F_{cp} / F_{0,ДВ} \quad - \text{коэффициент "остатка доње воде" унутар базена,}$$

$$F'_{\sigma,н} = F_{\sigma,н} / F_{0,ДВ} \quad - \text{коэффициент "варијације остатка доње воде".}$$

Са становишта стабилности конструкције добро је да они буду што већи, односно да што мање воде буде истиснуто из умирујућег базена.

Резултати свих експеримената су представљени у бездимензионом координатном систему, односно са релативним координатама:

$$\text{подужно: } X' = X / L_c, \quad \text{где је } L_c \text{ дужина умирујућег базена,}$$

$$\text{попречно: } Y' = Y / B_c, \quad \text{где је } B_c \text{ ширина умирујућег базена,}$$

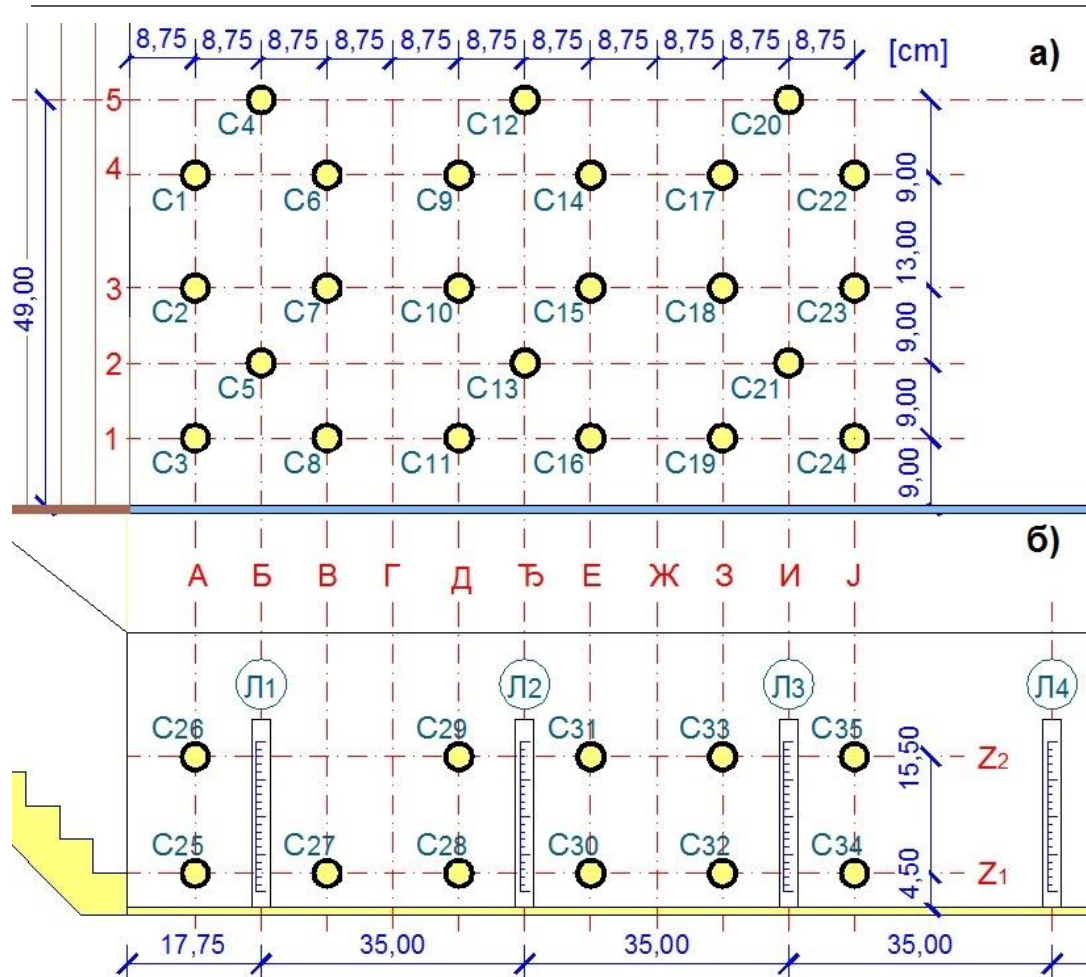
$$\text{висински: } Z' = Z / h_{ДВ}, \quad \text{где је } Z \text{ релативна кота у односу на дно базена, а } h_{ДВ} \text{ дубина доње воде.}$$

Такође, за потребе анализе резултата експеримената, сви параметри су посматрани преко одговарајућих бездимензионалних величина. Проток, Q , је представљен одговарајућим Фрудовим бројем, Fr_1 , на почетку базена, а низводни гранични услов, односно дубина доње воде, $h_{ДВ}$, одговарајућом реалном потољеношћу хидрауличког скока, $\Omega_{и}$.

4.7 Резултати мерења на моделу ГФ-0М

Модел ГФ-0М означава умирујући базен иза призматичног брзотока са мањим степеницима. Како на брзотоку нема сужења, ово је варијанта са најширим базеном: $B_c = 98$ cm, због чега је она била и најзахтевнија по питању мерне опреме. Узорковање је вршено са укупно 35 сонди, од којих су се 24 налазиле у десној половини дна, а 11 на десном зиду базена.

Шема постављања сонди је приказана на слици 4.30.



Слика 4.30 Распоред мерних сонди и лењира на моделу ГФ-0М

а) дно, б) зид

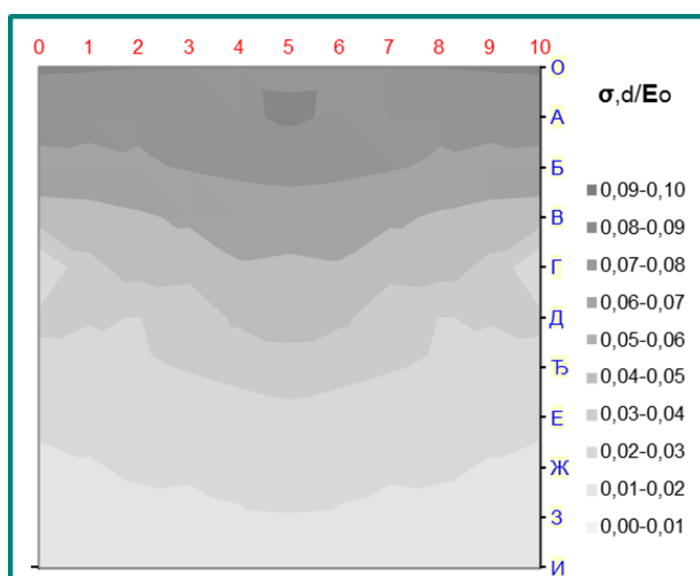
Табела 4.2 Резултати обраде мерних података на моделу ГФ-0М

Модел 0М-	Q20h9	Q20h10	Q20h11	Q20h12	Q40h14	Q40h15	Q40h16	Q40h17	Q60h18	Q60h19	Q60h20	Q60h21
L _c [cm]	50,00	50,00	50,00	50,00	70,00	70,00	70,00	70,00	90,00	90,00	90,00	90,00
Q [l/s]	20,30	20,30	20,30	20,30	40,30	40,30	40,30	40,30	62,50	62,50	62,50	62,50
h _{дв} [cm]	9,00	10,00	11,00	12,00	14,00	15,00	16,00	17,00	18,00	19,00	20,00	21,00
E _о [cm]	30,18	30,18	30,18	30,18	34,76	34,76	34,76	34,76	40,60	40,60	40,60	40,60
F _{г1}	69,339	69,339	69,339	69,339	42,018	42,018	42,018	42,018	33,617	33,617	33,617	33,617
Q _и	0,8458	0,9594	1,0712	1,1807	0,9846	1,0576	1,1305	1,2034	1,0200	1,0733	1,1301	1,1870
N	0,8379	0,9421	0,9522	0,9552	0,9522	0,9556	0,9699	0,9571	0,9556	0,9685	0,9623	0,9661
F _{ср,д}	0,4185	0,6402	0,7591	0,8114	0,6184	0,7560	0,7927	0,7848	0,6578	0,7222	0,7605	0,7910
F _{σ,д}	0,1128	0,0973	0,0804	0,0702	0,0854	0,0648	0,0591	0,0556	0,0690	0,0619	0,0538	0,0497
F [*] _{σ,д}	0,1130	0,0974	0,0809	0,0706	0,0858	0,0643	0,0588	0,0560	0,0694	0,0625	0,0543	0,0508
F _{ср,ду}	0,2174	0,4914	0,6533	0,7267	0,4363	0,6272	0,6870	0,6893	0,4881	0,5921	0,6554	0,7072
F _{σ,ду}	0,1364	0,1654	0,1376	0,1177	0,1467	0,1170	0,1011	0,0931	0,1209	0,1076	0,0913	0,0816
F [*] _{σ,ду}	0,1434	0,1660	0,1385	0,1175	0,1498	0,1135	0,1000	0,0929	0,1211	0,1084	0,0905	0,0819
F _{ср,дн}	0,6195	0,7890	0,8648	0,8960	0,8004	0,8849	0,8984	0,8803	0,8274	0,8523	0,8656	0,8747
F _{σ,дн}	0,1527	0,0829	0,0686	0,0645	0,0787	0,0643	0,0627	0,0623	0,0595	0,0535	0,0543	0,0521
F [*] _{σ,дн}	0,1542	0,0853	0,0698	0,0661	0,0839	0,0605	0,0620	0,0627	0,0620	0,0579	0,0559	0,0571
maxH [*] _{ср,з}	1,1808	1,6805	1,5812	1,5016	1,3675	1,4067	1,4915	1,3914	1,3259	1,4604	1,4205	1,4665
maxM [*] _{ср,з}	3,0078	3,7057	3,1297	2,6374	2,1018	2,1739	2,3644	2,1291	2,0238	2,3347	2,2449	2,3488
maxH [*] _{σ,з}	0,2074	0,2958	0,2390	0,1999	0,2070	0,2767	0,2233	0,1948	0,2191	0,2013	0,1625	0,1735
maxM [*] _{σ,з}	0,4835	0,7606	0,4625	0,3628	0,3373	0,6213	0,4108	0,3348	0,3476	0,2960	0,2384	0,2295

У табели 4.2 приказани су најважнији резултати добијени обрадом измерених података. Резултати добијени узорковањем, уклапају се у стандардну слику хидрауличког скока у умирујућем базену. Средњи притисци су у највећем делу базена усаглашени са линијом нивоа, што значи да је хидростатичко оптерећење, односно тежина воде унутар умирујућег базена, доминантна компонента која одређује средње притиске.

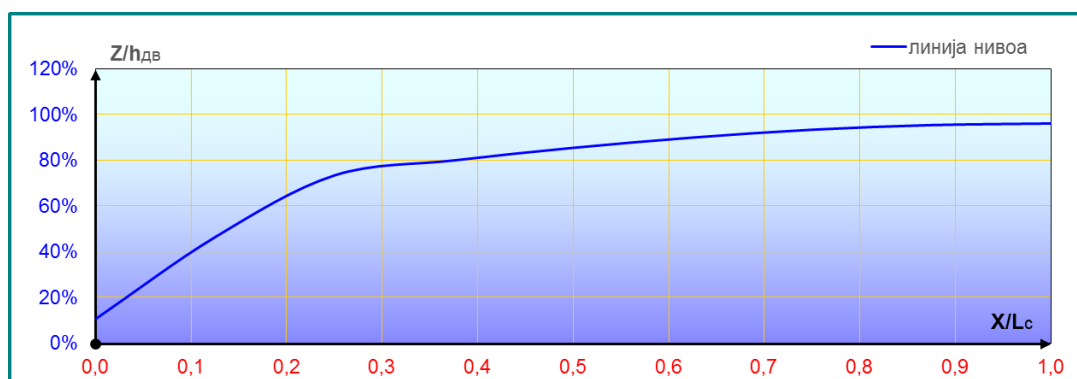
Пулзације су присутне унутар целог базена, али су доминантне на почетку хидрауличког скока (слика 4.31). Са порастом дубине воде, оне су све пригушеније. У односу на средње притиске, ово оптерећење је мало при већој потопљености хидрауличког скока, али постаје значајније при мањим потопљеностима, нарочито у узводном делу базена.

На свим дијаграмима притисака на дно, како код пулзација, тако и код средњих притисака, (слике 4.31 и 4.35), уочава се зона увећаних притисака око средине узводне ивице базена. Она настаје као последица неефикасности решетке у резервоару, што за последицу има неравномеран доток на преливну ивицу, тако да се у појединим мерењима појављују и до 5% одступања у висини преливног млаза на средини и у боковима прелива. Како је тачност мерне инсталације мања од 10%, ово повећање утицаја, иначе локалног карактера, се може занемарити.

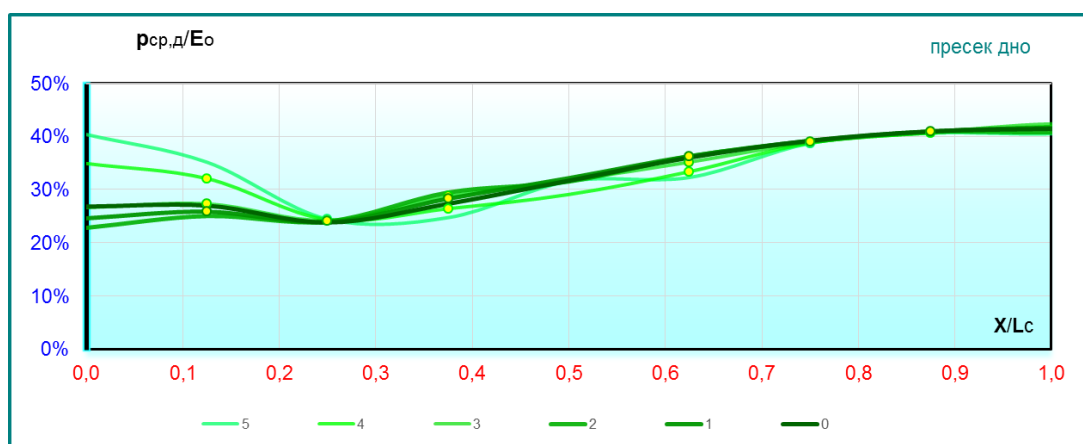


Слика 4.31 Пулзације на дну базена за експеримент 0MQ60h19

На сликама 4.32 и 4.33 су приказани линија нивоа за експеримент ГФ-0MQ40h15 и одговарајући средњи притисци по подужним пресецима. У осталим експериментима нису примећена значајнија одступања.



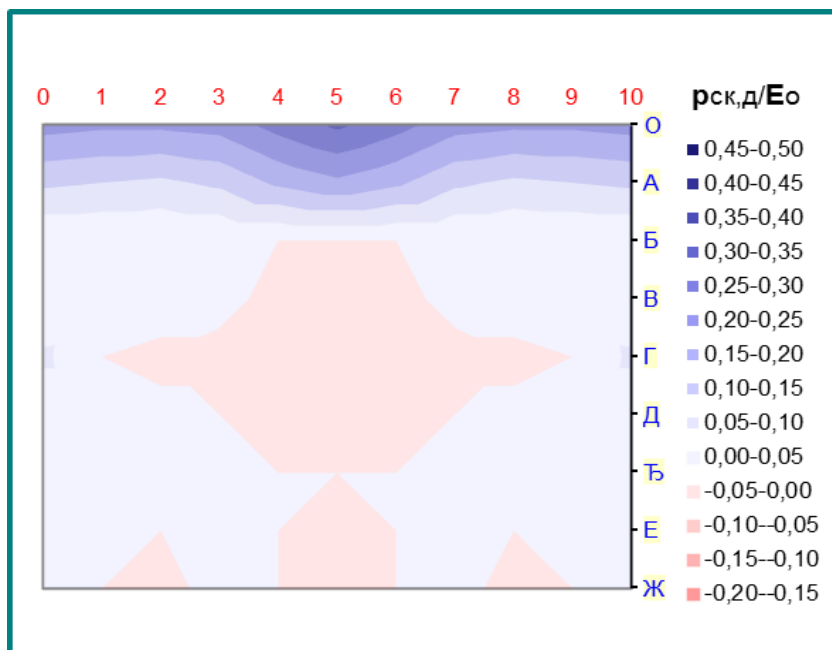
Слика 4.32 Линија нивоа за експеримент 0MQ40h15



Слика 4.33 Средњи притисци по подужним пресецима за експеримент 0MQ40h15

Као што се уочава, разлика постоји на узводној петини дужине умирујућег базена, где млаз воде из брзотока мења правац. Услед ове промене, јављају се утицаји које можемо назвати инерцијалним "скретним силама". Ови утицаји се могу најбоље сагледати кроз равнотежу вертикалних сила од тежине воде, одређених мерењем дубине на лењирима, и реакционе силе са дна базена, добијене интеграљењем средњих притисака на сондама. Ова, релативно груба процена (због непознавања количине увученог ваздуха), приказана је на слици 4.34.

Може се уочити да се утицаји од скретања, у виду "скретних притисака" на дну, $p_{ск,д}$, јављају на самом почетку умирујућег базена са интензитетом од око 30 - 40% преостале енергије на брзотоку.



Слика 4.34 Скретни притисци, $p_{ск,д}$, по подужним пресецима за експеримент 0MQ40h15

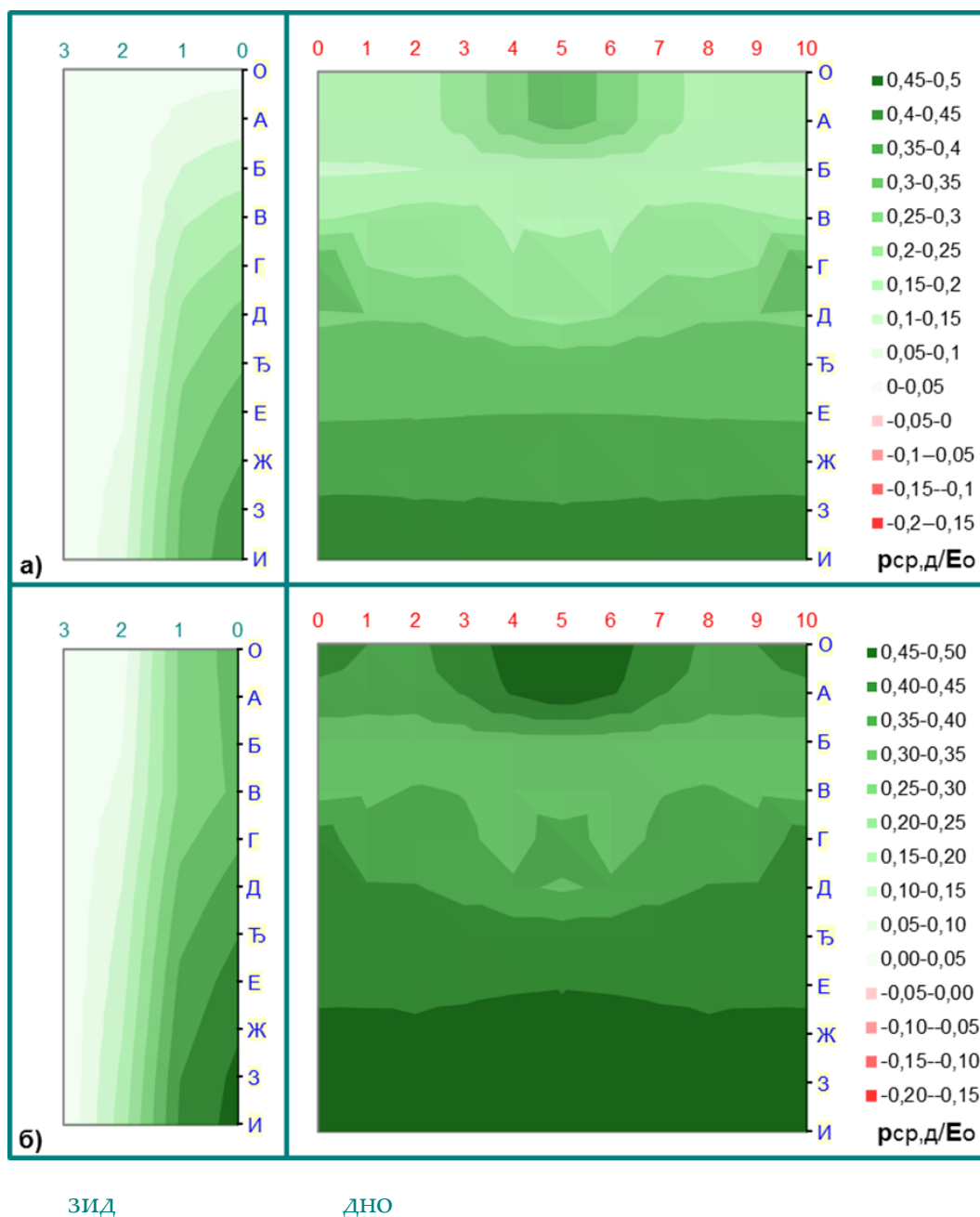
Утицаји који настају услед дејства воде на конструктивне елементе умирујућег базена, варирају са свим параметрима који одређују течење у базену. На моделу ГФ-0М, варијације настају како са променом протока, односно са променом Фрудовог броја, тако и са променом коте доње воде, односно потопљености хидрауличког скока на крају базена:

$$\Omega_{II} \approx \frac{h_{II}}{h_2} \quad (4.52)$$

односно на растојању: $X_{II} = L_c = 5 \cdot h_2$ од његовог почетка.

У циљу формирања слике о природи тих варијација, потребно је сагледати како се мењају посматрани утицаји, када се мења само један параметар. Мерења утицаја су вршена за задате протоке, па је сваки од експеримената слика промене утицаја $F(\Omega_{II})$ по параметру Q , односно по параметру Fr_1 . Са друге стране, експерименти су рађени за различите дубине доње воде, па се промене утицаја $F(Q)$ изражавају по параметру σ_{II} . Средњи притисци, и пулзације на конструктивне елементе умирујућег

базена, за две различите потољности хидрауличког скока, при једнаком протоку (истом Фрудовом броју) приказани су на слици 4.35.



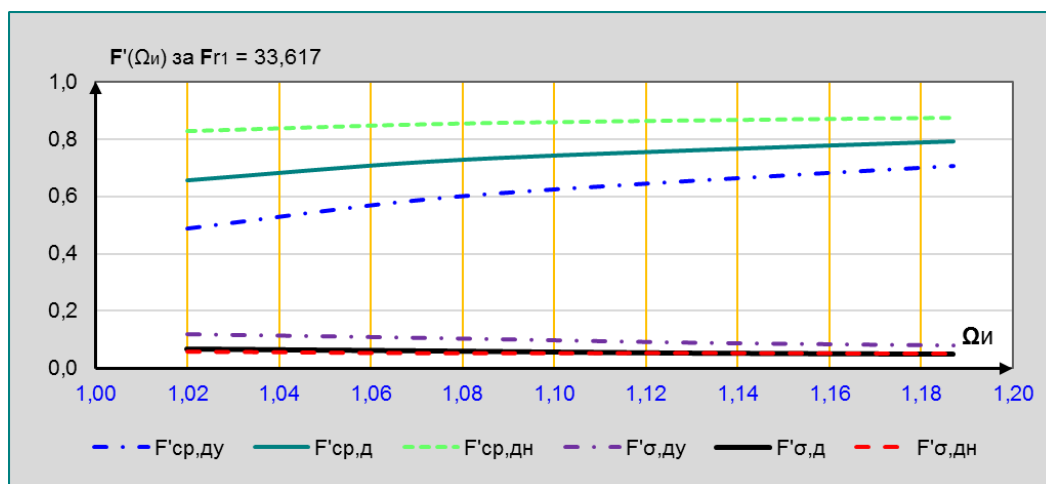
ЗИД

ДНО

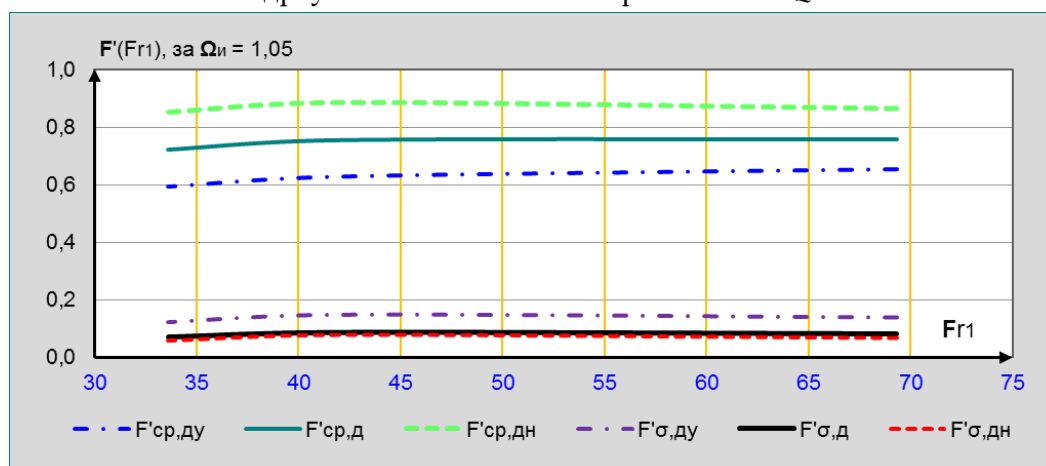
Слика 4.35 Средњи притисци за експерименте 0MQ60 при различитим потољностима хидрауличког скока а) $\Omega_{и,1} = 1,03$ и б) $\Omega_{и,2} = 1,19$ и истим Фрудовим бројем $Fr_1 = 33,617$

Уочава се да повећање потољности значајно подиже ниво воде у целом базену, и благо помера хидраулички скок узводно, при чему нема битијих промена расподеле притисака.

На дијаграму најважнијих утицаја на дну базена при константном протоку $Q = 60 \text{ l/s}$ (слика 4.36), односно Фрудовом броју $Fr_1 = 33,617$ може се приметити да са порастом потопљености скока, средњи притисци расту, а пулзације опадају. Ово је у сагласности са запаженом прерасподелом притисака унутар базена.



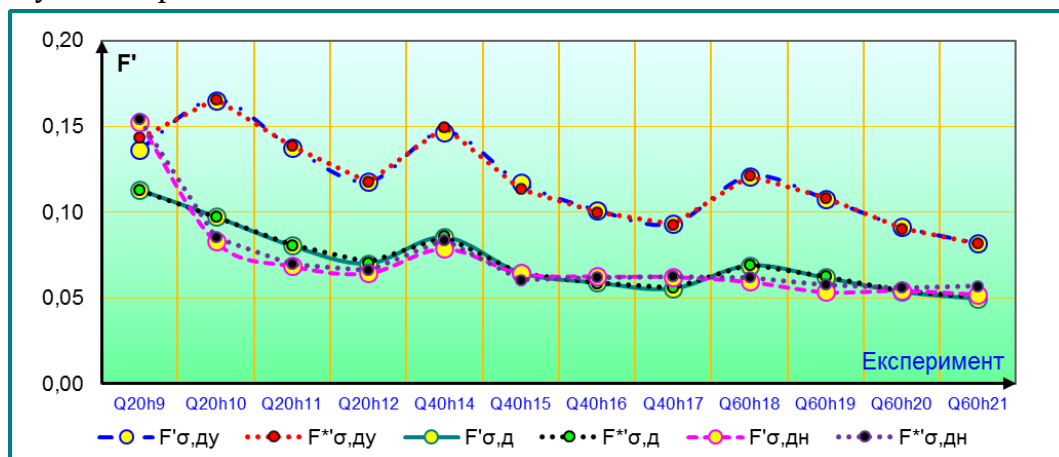
Слика 4.36 Промена утицаја у базену, при варијацији потопљености хидрауличког скока за експерименте 0MQ60



Слика 4.37 Промена утицаја у базену, при варијацији Фрудовог броја при сличној потопљености хидрауличког скока у базену за модел ГФ-0М

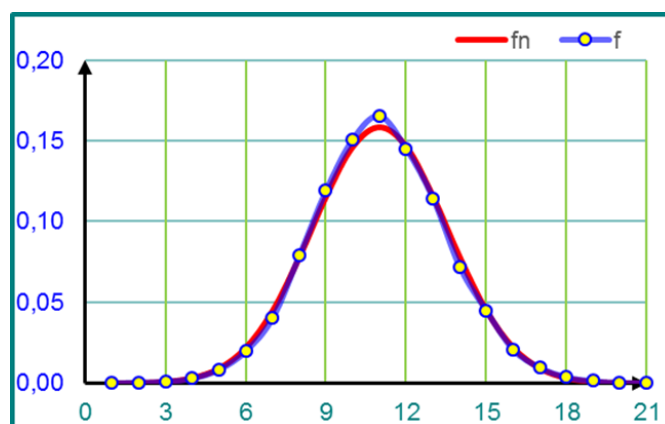
Ако се посматрају промене главних утицаја на дно, за различите Фрудове бројеве, при једнаким потопљеностима хидрауличког скока, може се приметити да су промене мање него при варирању потопљености (слика 4.37). На основу тога се може закључити да је потопљеност хидрауличког скока величина од које доминантно зависе силе у базену, на моделу ГФ-0М.

Силе од средњих притисака и пулзација на дно умирујућег базена срачунате су, најпре директном статистичком анализом низова утицаја добијених на основу измерених притисака током узорковања, а потом и поступком из литературе [2], који се заснива на претпоставци да је расподела података нормална. За силе од средњих притисака добијено је готово потпуно слагање, док се код сила од пулзација појавило мало одступање приказано на слици 4.38.



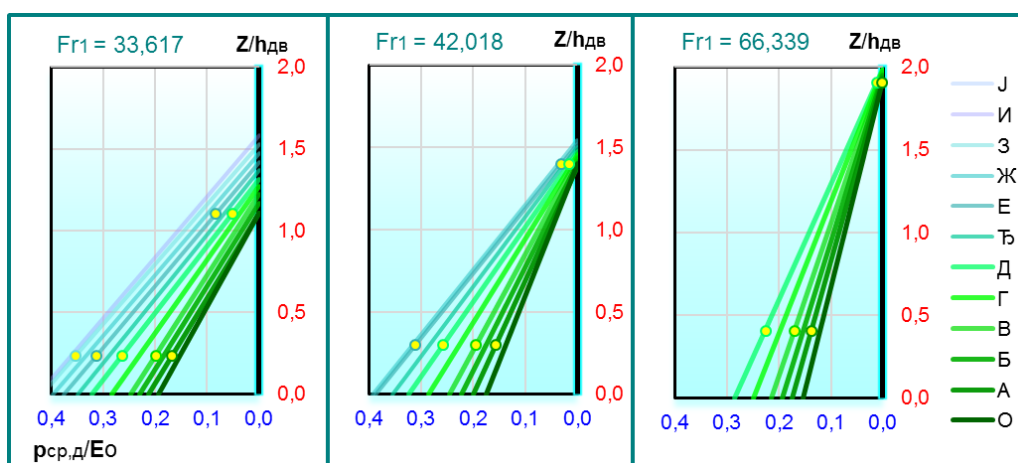
Слика 4.38 Слагање сила од пулзација (F') добијених директном методом, са силама (F^*) добијеним поступком датим у литератури [2]

Слагања сила се крећу између 90 и 100% и у сваком од експеримената има вредност веома блиску вредности слагања расподеле притисака добијених узорковањем са нормалном расподелом (слика 4.39), што се и могло очекивати.

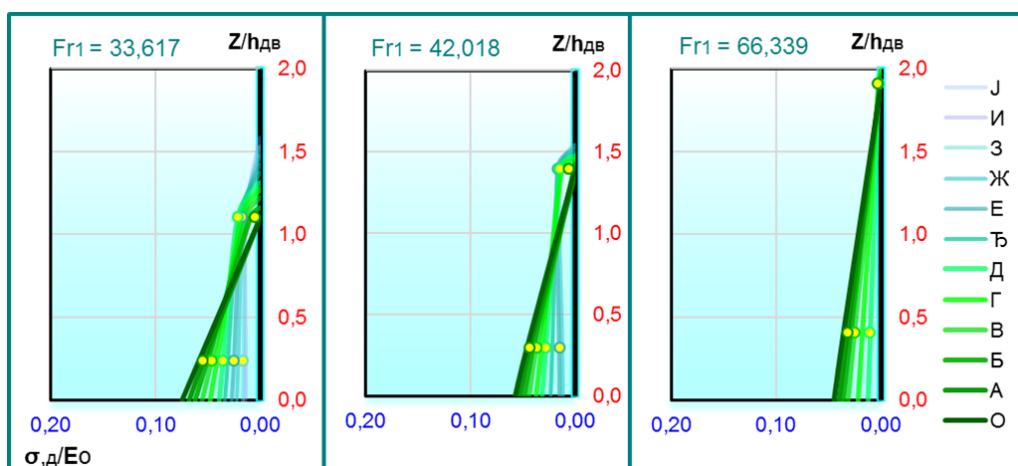


Слика 4.39 Слагање расподеле података са мерних сонди и нормалне (Гаусове) расподеле за експеримент ГФ-0MQ40h17

Оптерећење на зид умирујућег базена зависи и од "висине запљускивања" у одређеном попречном пресеку. Из резултата узорковања може се уочити да иако су поједине мерне сонде биле стално изнад линије нивоа, оне су ипак регистровале притиске. Обрадом резултата мерења, уочено је да су пулзације у зони нивоа воде прилично изражене, и дају значајан допринос укупним утицајима, посебно моменту у уклештењу. Са дијаграма средњих притисака на зид (слика 4.40) и пулзација на зид (слика 4.41), за различите вредности Фрудовог броја (протока), а при једнаким коефицијентима потопљености хидрауличког скока Ω_{II} , може се приметити да је при нижим протоцима висина запљускивања знатно већа него при вишим, али су притисци, као и пулзације, мањих интензитета.



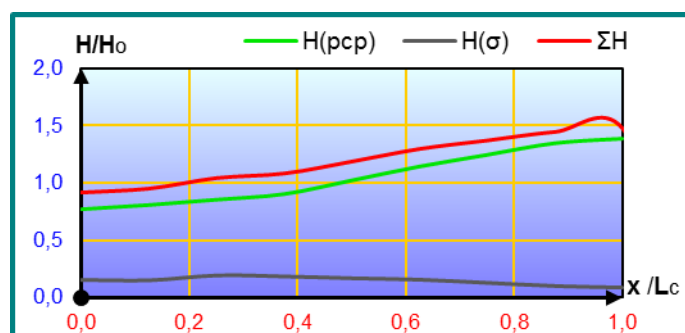
Слика 4.40 Промена средњих притисака на зид базена, при варијацији Фрудовог броја и истој потопљености хидрауличког скока



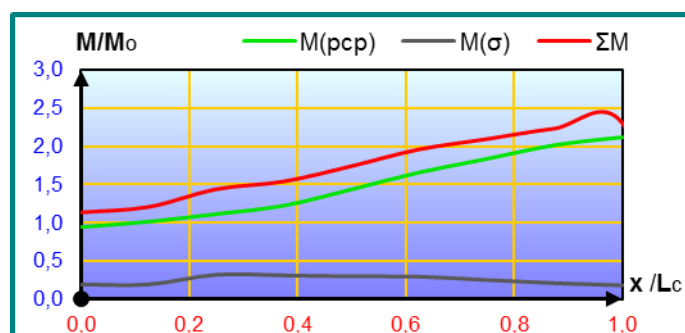
Слика 4.41 Промена пулзација притиска на зид базена, при варијацији Фрудовог броја и истој потопљености хидрауличког скока

Са порастом Фрудовог броја, може се уочити и значајан пораст пулзација у близини линије нивоа ($Z/h_{ДВ} = 1$), посебно у низводнијим пресецима (светлије линије на дијаграму).

На сликама 4.42 и 4.43 приказан су дијаграми хоризонталне силе и момента у уклештењу дуж зида базена. Приказане су посебно средње вредности утицаја, пулзације, као и укупни утицаји за експеримент: 0MQ40h15. Сличан облик зависности добијен је и при свим осталим експериментима.



Слика 4.42 Промена хоризонталне силе у уклештењу дуж зида базена

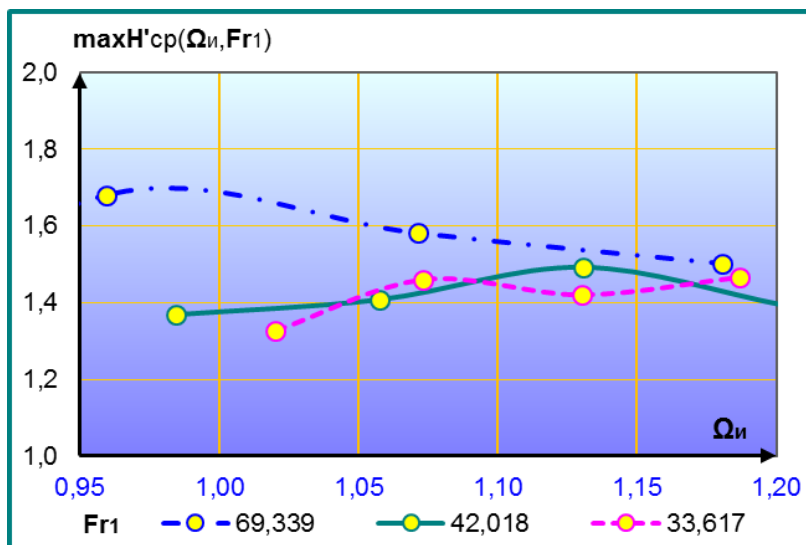


Слика 4.43 Промена момента у уклештењу дуж зида базена

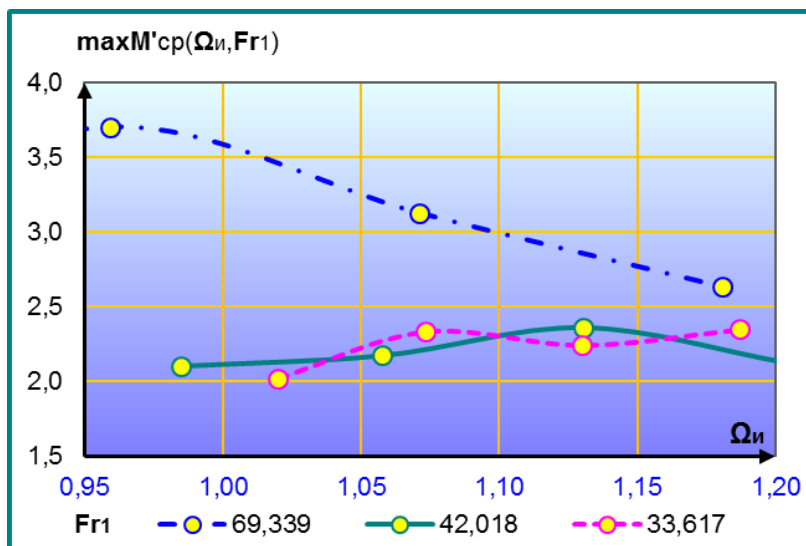
Максималне хоризонталне силе и максимални momenti од средњих притисака се увек налазе на низводном крају умирујућег базена, што је последица највеће дубине воде у у тим пресецима. Максимални утицаји од пулзација јављају се у пресецима где је турбуленција хидрауличког скока најинтензивнија, тј. нешто низводније од суженог пресека.

Анализирани су максимални утицаји од средњих притисака за различите експерименте на моделу ГФ-0М (слике 4.44 и 4.45). Може се закључити да су за ниже вредности Фрудовог броја ови утицаји знатно израженији, док при већим Фрудовим бројевима (већем протоку) они конвергирају вредностима од око 1,75 за хоризонталне силе, и 3,75 за

моменте. При томе, максимални добијени утицаји за веће Фрудове бројеве се јављају при нижим коефицијентима потопљености хидрауличког скока, него при вишим.

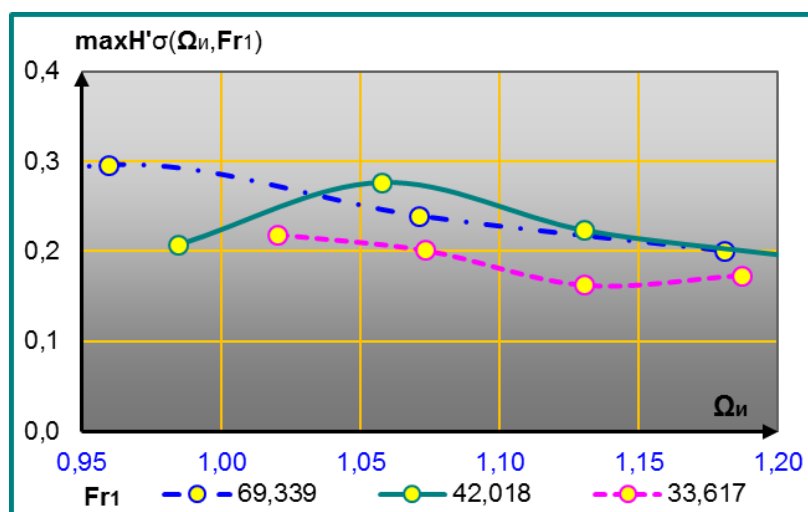


Слика 4.44 Промена максималне хоризонталне силе у уклештењу зида услед средњих притисака, у зависности од потопљености скока и Фрудовог броја на моделу ГФ-0М



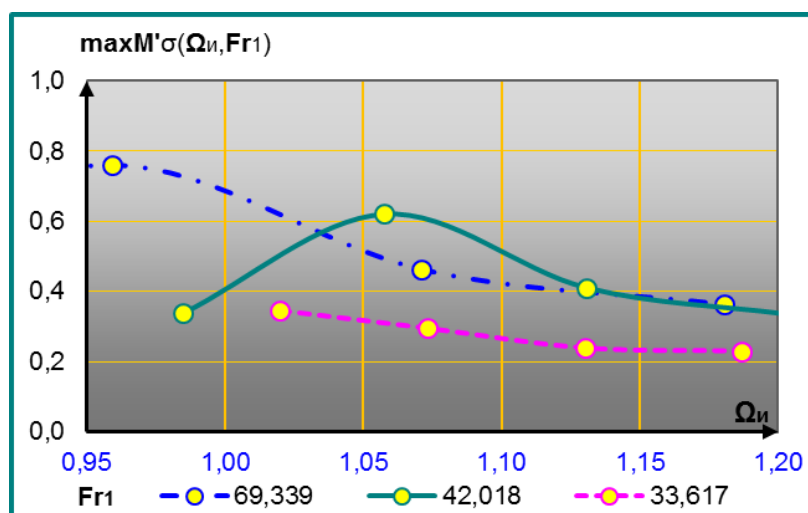
Слика 4.45 Промена максималног момента у уклештењу зида базена услед средњих притисака, у зависности од потопљености скока и Фрудовог броја на моделу ГФ-0М

Зависност максималних утицаја од пулзација је знатно сложеније (слике 4.46 и 4.47).



Слика 4.46 Промена максималне хоризонталне силе у уклештењу зида базена услед пулзација, у зависности од потопљености скока и Фрудовог броја на моделу ГФ-0М

Пошто су ови утицаји су знатно мањи од одговарајућих утицаја услед средњих притисака, а и јављају се ближе суженом пресеку, него низводном крају базена (где су утицаји од средњих притисака највећи) то је њихов допринос меродавном оптерећењу у уклештењу зида занемарив.



Слика 4.47 Промена максималног момента у уклештењу зида базена услед пулзација, у зависности од потопљености скока и Фрудовог броја на моделу ГФ-0М

Утицаја од средњих притисака се могу сматрати повременим оптерећењем за конструктивне елементе умирујућег базена. Оптерећење од пулзационих сила може деловати у оба смера, па се може третирати

слично као и сеизмичко оптерећење, али треба имати у виду да оно има још и додатну „неизвесност“ јер се не јавља истим интензитетом на целом конструктивном елементу у посматраном тренутку времена. Стога не треба да чуди што збир производа ордината пулзационих притисака и припадајућих површина на које они делују, има знатно већу вредност од добијене силе за посматрани конструктивни елемент. Овај однос:

$$P'_\sigma = \frac{\sum_i \sigma_i \cdot A_i}{F_\sigma}$$

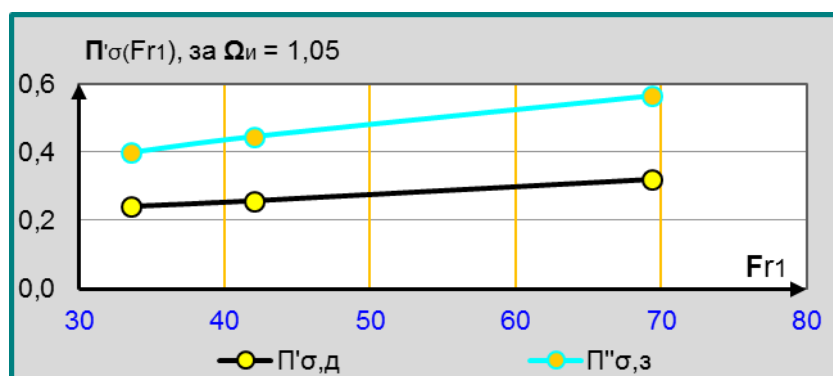
може се назвати „коэффициентом пригушења“, P'_σ пулзационе силе услед неједновременог деловања.

У табели 4.3 приказани су ови коэффициенти у дну умирујућег базена, током експеримената на моделу ГФ-0М.

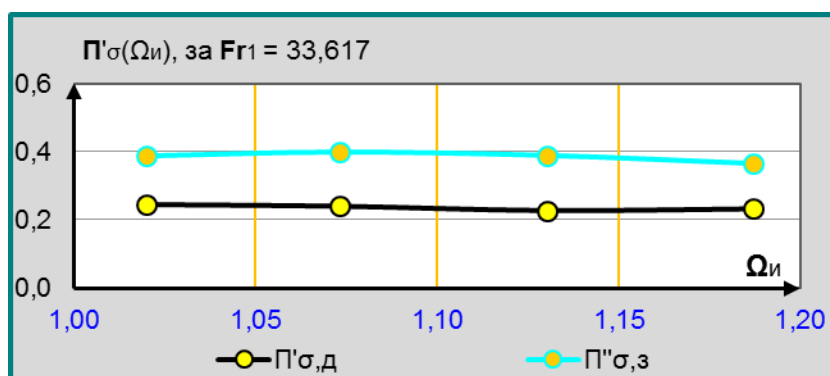
Табела 4.3 Коэффициенти пригушења пулзационе силе на моделу ГФ-0М

P'_σ	$\Omega_{и}$	0,8458	0,9594	1,0712	1,1807	
$Fr_1 =$		69,339	0,3297	0,3325	0,3220	0,3113
P'_σ	$\Omega_{и}$	0,9846	1,0576	1,1305	1,2034	
$Fr_1 =$		42,018	0,2925	0,2576	0,2621	0,2617
P'_σ	$\Omega_{и}$	1,0200	1,0733	1,1301	1,1870	
$Fr_1 =$		33,617	0,2453	0,2403	0,2277	0,2326

Ако се изврши парцијална анализа утицаја потољности хидрауличког скока, $\Omega_{и}$, и Фрудовог броја Fr_1 на пригушење пулзационих сила (слике 4.48 и 4.49), може се видети да превлађује утицај Фрудовог броја, и то израженије на зиду него у дну.

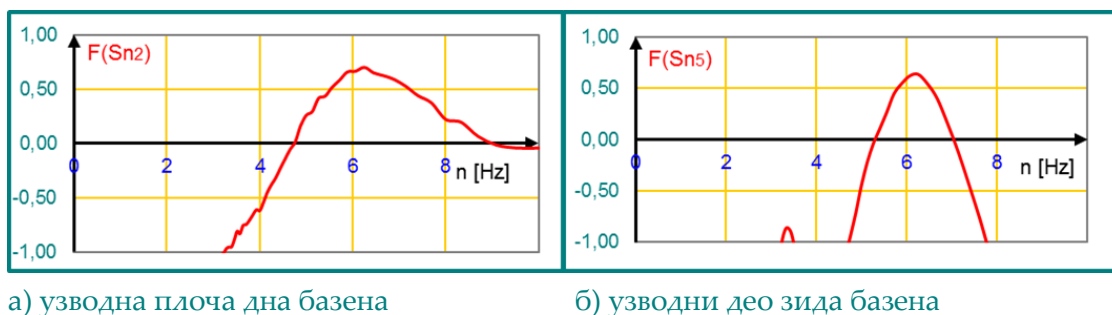


Слика 4.48 Промена коэффициента пригушења пулзационе силе у зависности од Фрудовог броја, при истој потољности хидрауличког скока на моделу ГФ-0М



Слика 4.49 Промена коефицијента пригушења пулзационе силе у зависности од потопљености хидрауличког скока при истом Фрудовом броју за модел ГФ-0М

Поред динамичких утицаја, током експеримената су посматране и фреквентне карактеристике на начин детаљно приказан у [6]. Уместо анализе за податке узорковане на појединачним сондама, анализа је спроведена за низове срачунатих статичких утицаја на посматрани део конструкције. Анализа је била ограничена на фреквентни домен у коме се појављивала амплификација. Уочено је да доминантне фреквенце утицаја постоје на узводним елементима конструкције, али само ако је хидраулички скок одбачен, односно када је $\Omega_{II} < 1$ (слика 4.50).



а) узводна плоча дна базена

б) узводни део зида базена

Слика 4.50 Доминантне фреквенце утицаја на узводни део базена у експерименту: 0MQ40h14 ($\Omega_{II} = 0,98$)

Може се приметити да је доминантна фреквенца утицаја на оба конструктивна елемента приближно 6 Hz, али и да је знатно израженија на зиду, него у дну. Ове фреквенце нису значајне за круте и тешке бетонске конструктивне елементе умирујућих базена. О њима би се могло водити рачуна уколико би се у разделном зиду налазио неки отвор са лаком металном клапном, али и то само када би се положај тог отвора налазио у зони око суженог пресека.

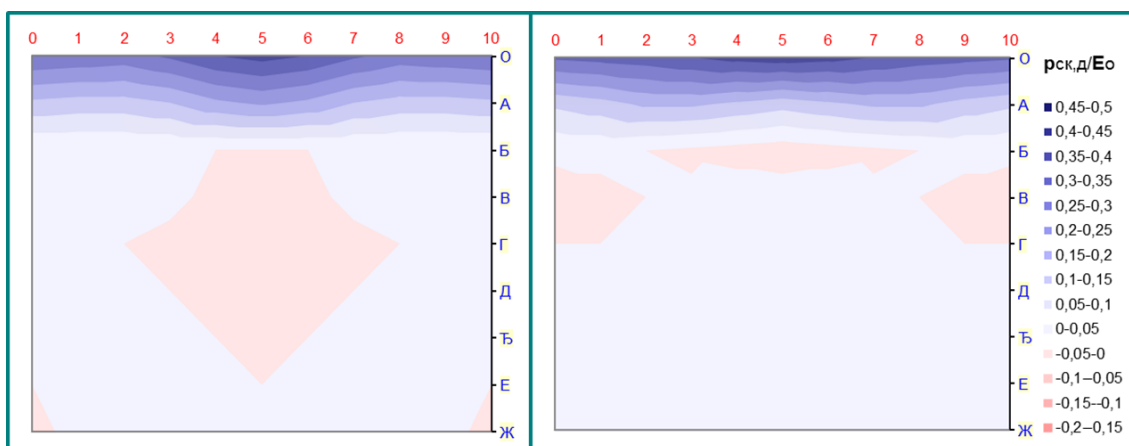
4.8 Резултати мерења на моделу ГФ-0V

Умирујући базен модел ГФ-0V је потпуно идентичан моделу ГФ-0M. Разлика је у величини степеника на брзотоку, који су два пута већи него на моделу ГФ-0M. Шема постављања мерних сонди и коришћена мерна опрема су исти као и за модел ГФ-0M (слика 4.30). Добијени резултати приказани су у табели 4.4.

Табела 4.4 Резултати обраде мерних података на моделу ГФ-0V

Модел 0V-	Q20h9	Q20h10	Q20h11	Q20h12	Q40h14	Q40h15	Q40h16	Q40h17	Q60h17	Q60h18	Q60h19	Q60h20
Lc [cm]	50,00	50,00	50,00	50,00	70,00	70,00	70,00	70,00	95,00	95,00	95,00	95,00
Q [l/s]	20,40	20,40	20,40	20,40	40,08	40,08	40,08	40,08	62,60	62,60	62,60	62,60
h _{дв} [cm]	9,00	10,00	11,00	12,00	14,00	15,00	16,00	17,00	17,50	18,00	19,00	20,00
E ₀ [cm]	29,17	29,17	29,17	29,17	35,91	35,91	35,91	35,91	44,39	44,39	44,39	44,39
F _{Г1}	65,403	65,403	65,403	65,403	44,531	44,531	44,531	44,531	38,818	38,818	38,818	38,818
Ω _и	0,8397	0,9740	1,0758	1,1739	1,0157	1,0606	1,1208	1,2028	0,9451	0,9871	1,0386	1,0938
N	0,9478	0,9480	0,9236	0,9478	0,9031	0,9677	0,9617	0,9609	0,9447	0,9658	0,9299	0,9613
F' _{ср,д}	0,7880	0,9113	0,9030	0,9685	0,7482	0,8301	0,8714	0,9061	0,7045	0,7382	0,8120	0,8483
F' _{σ,д}	0,1084	0,0746	0,0650	0,0521	0,0868	0,0727	0,0627	0,0581	0,0739	0,0685	0,0589	0,0539
F* _{σ,д}	0,1086	0,0749	0,0651	0,0530	0,0871	0,0726	0,0632	0,0585	0,0747	0,0691	0,0586	0,0538
F' _{ср,ду}	0,6383	0,8091	0,8154	0,8960	0,5951	0,7198	0,7834	0,8335	0,5396	0,5804	0,7024	0,7621
F' _{σ,ду}	0,1960	0,1338	0,1158	0,0929	0,1581	0,1306	0,1124	0,1019	0,1295	0,1232	0,1055	0,0920
F* _{σ,ду}	0,1972	0,1317	0,1156	0,0928	0,1582	0,1297	0,1128	0,1021	0,1311	0,1243	0,1044	0,0916
F' _{ср,дн}	0,9377	1,0135	0,9905	1,0410	0,9012	0,9404	0,9593	0,9786	0,8693	0,8961	0,9216	0,9345
F' _{σ,дн}	0,0700	0,0597	0,0524	0,0434	0,0714	0,0651	0,0583	0,0568	0,0669	0,0570	0,0515	0,0528
F* _{σ,дн}	0,0743	0,0601	0,0505	0,0443	0,0732	0,0655	0,0573	0,0570	0,0702	0,0591	0,0523	0,0552
maxH' _{ср,з}	2,0669	2,0387	1,7667	1,7553	1,4494	1,5921	1,4816	1,4303	1,3377	1,4257	1,5129	1,4914
maxM' _{ср,з}	5,6328	4,8742	3,7021	3,1872	2,3554	2,6531	2,3729	2,2477	2,0809	2,2699	2,4763	2,4241
maxH' _{σ,з}	0,5852	0,3043	0,2568	0,3164	0,2771	0,2438	0,2389	0,2023	0,2318	0,2047	0,2369	0,1746
maxM' _{σ,з}	1,9657	0,8013	0,7257	0,7775	0,4761	0,4720	0,3866	0,3165	0,3497	0,3255	0,3365	0,2409

Најзначајнија особеност свих експеримената на моделу ГФ-0V, је да се брзина тока, на већим степеницима, преусмерава у хоризонтални правац, па је зона скретних притисака благо смањена (слика 4.51).

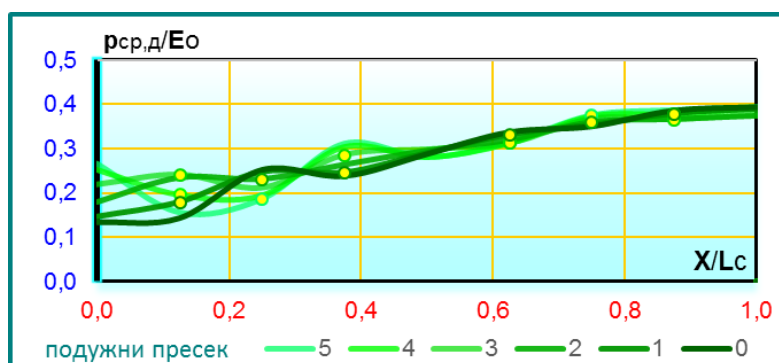


а)

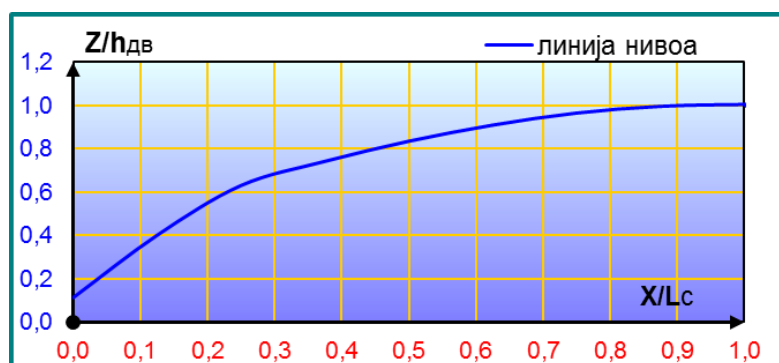
б)

Слика 4.51 Скретни притисци у дну умирујућег базена за експерименте а) 0VQ40h17 и б) 0VQ40h17

Ово има за последицу губитак зоне увећаних средњих притисака испред суженог пресека, па њихови дијаграми од почетка до краја умирујућег базена равномерно расту (слика 4.52). Ово такође важи и за линију нивоа (слика 4.53), па се на овом моделу потврђује констатација да средњи притисци прате линију нивоа, сада још израженије због умањења скретних притисака.

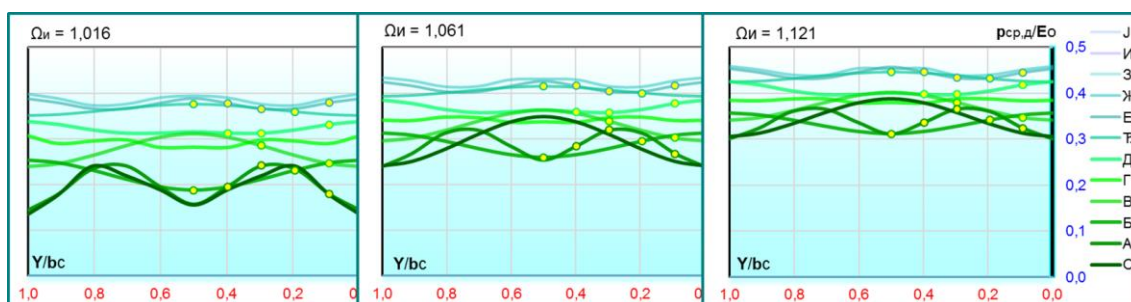


Слика 4.52 Средњи притисци на дно умирујућег базена за експеримент 0VQ40h14



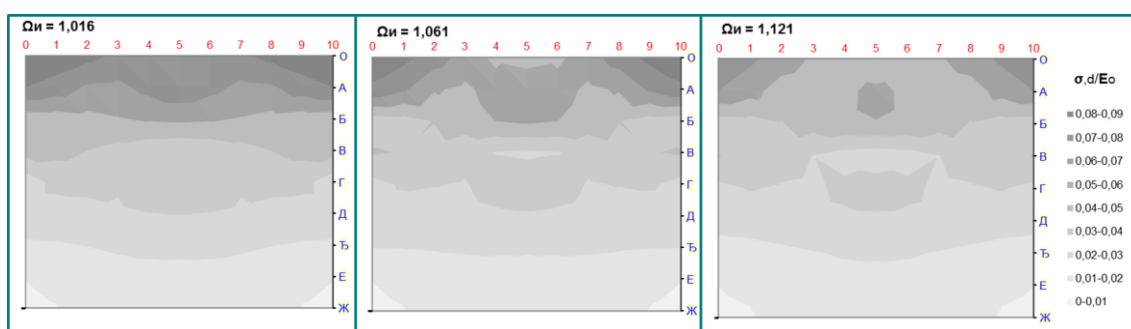
Слика 4.53 Линија нивоа у базену за експеримент 0VQ40h14

На слици 4.51 се уочава да у зони почетка хидрауличког скока долази до нарушавања равномерности средњих притисака у попречном пресеку. Ова појава је израженија за мање потопљености скока, док код већих потопљености, расподела средњих притисака по попречним пресецима постаје равномернија. Ово се може јасније уочити ако се упореде попречне расподеле средњих притисака за исти проток, односно Фрудов број, у суженом пресеку и различите потопљености хидрауличког скока (слика 4.53). Ово нарушавање равномерности у попречној расподели средњих притисака, увек прати повећање вредности пулзационих притисака у попречном пресеку.



Слика 4.54 Расподела средњих притисака у попречним пресецима умирујућег базена при $Fr_1 = 44,5$ и различитим потопљностима скока

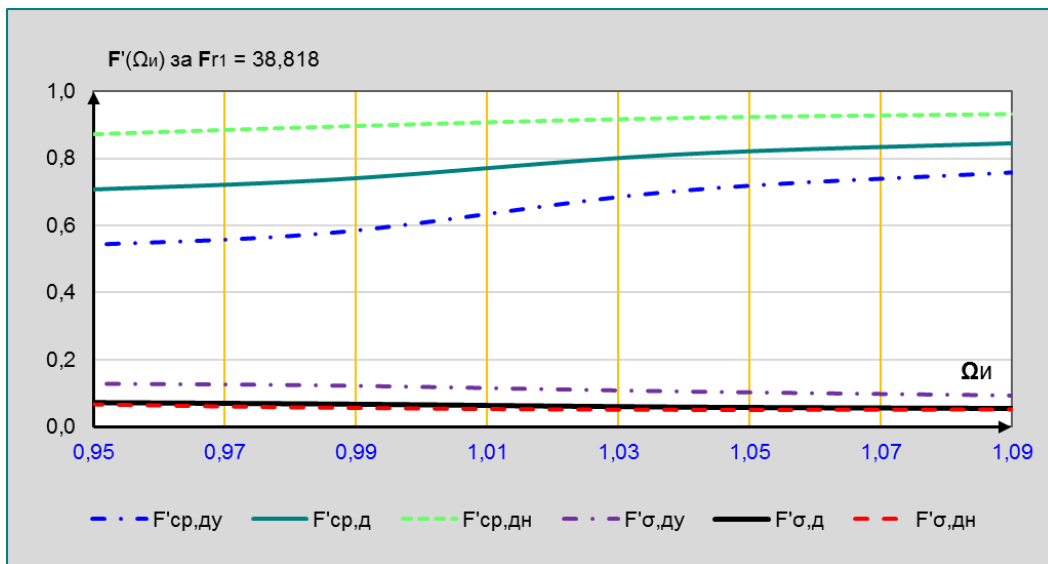
Са смањењем неравномерности средњих притисака, услед повећања потапања хидрауличког скока, пулзациони притисци опадају (слика 4.55).



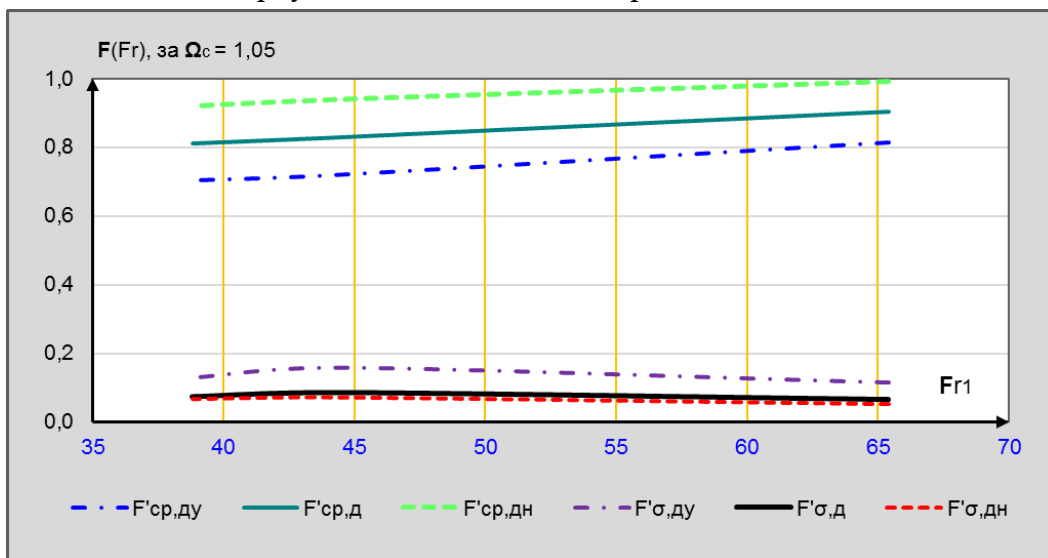
Слика 4.55 Расподела пулзационих притисака у попречним пресецима умирујућег базена при $Fr_1 = 44,5$ и различитим потопљностима скока

Повећање степеника на брзотоку смањује турбуленције у умирујућем базену, сужени пресек се помера узводно и повећава се количина доње воде унутар базена. Ово има за последицу повећање сила од средњих притисака (које су корисне са становишта стабилности умирујућег базена) и смањење пулзационих сила (које су неповољне на разне начине).

Граничном анализом је и на овом моделу посматрана промена укупне вертикалне силе, како од средњих притисака, тако и од пулзација на дно умирујућег базена. На дијаграму најважнијих утицаја на дну базена при константном протоку $Q = 60$ l/s (слика 4.56), односно Фрудовом броју $Fr_1 = 44,39$, може се приметити да са порастом потопљености скока, средњи притисци расту, а пулзације опадају, али не толико изражено као у експериментима 0MQ60 (слика 4.36). Ово је у сагласности са већ констатованим слабљењем пулзација на моделу ГФ-0V у односу на ГФ-0M.



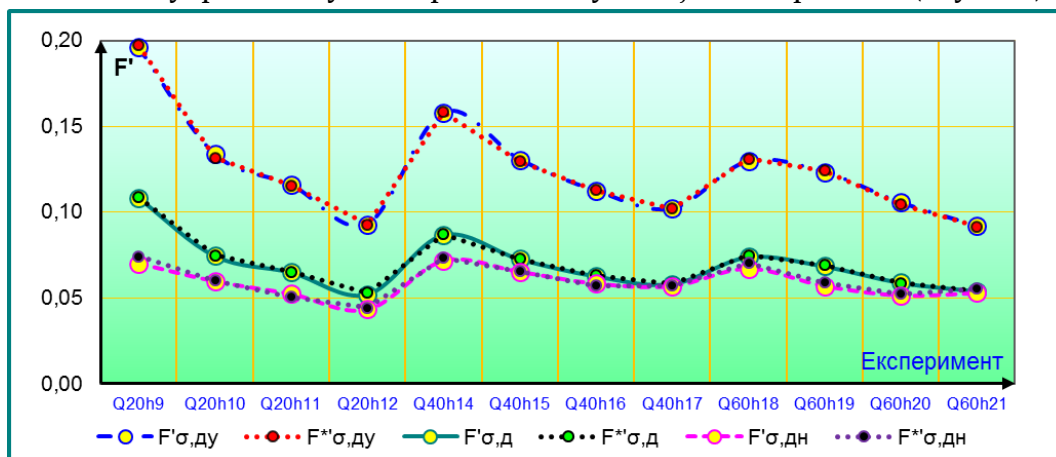
Слика 4.56 Промена утицаја у базену, при варијацији потопљености хидрауличког скока за експерименте 0VQ60



Слика 4.57 Промена утицаја у базену, при варијацији Фрудовог броја и истој потопљености хидрауличког скока у базену за модел ГФ-0V

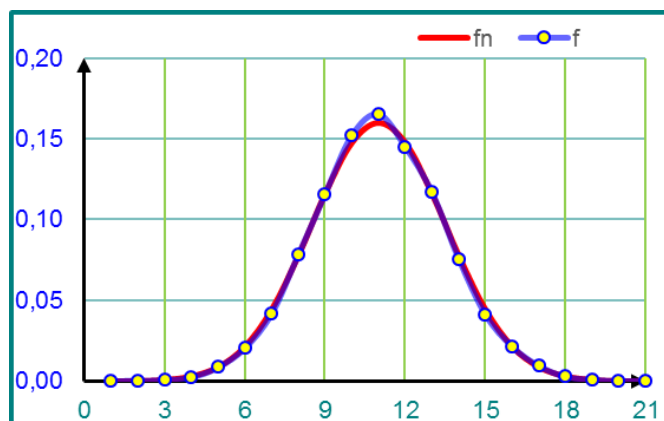
Ако се посматрају промене главних утицаја на дно, за различите вредности Фрудовог броја, при приближно једнаким потопљеностима хидрауличког скока, сада се може уочити промена која је слична промени при варијацији потопљености хидрауличког скока. Ово је значајна разлика у односу на модел ГФ-0M (слика 4.37), јер се овде не може рећи да од било ког услова (Фрудовог броја у суженом пресеку, или потопљености хидрауличког скока), доминантно зависе силе у базену.

Занимљиво је да су на моделу ГФ-0V разлике добијених утицаја приликом прорачуна двема различитим методама још мање него на моделу ГФ-0M (слика 4,58). Овде се може закључити да су пулзације доминантни узрок одступања расподеле утицаја од нормалне (Гаусове).



Слика 4.58 Слагање сила од пулзација (F') добијених различитим методама, прорачуна на моделу ГФ-0V

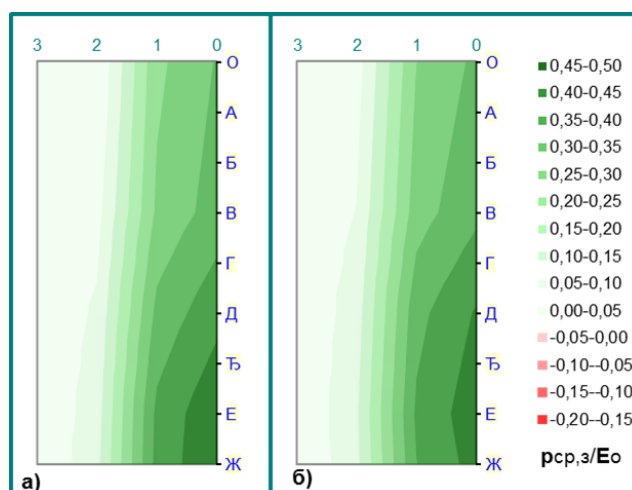
Слагања сила се на моделу ГФ-0V крећу између 93,8 и 100% и у сваком од експеримената имају готово идентичну вредност са слагањем расподеле притисака добијених узорковањем и нормалне расподеле (слика 4.59).



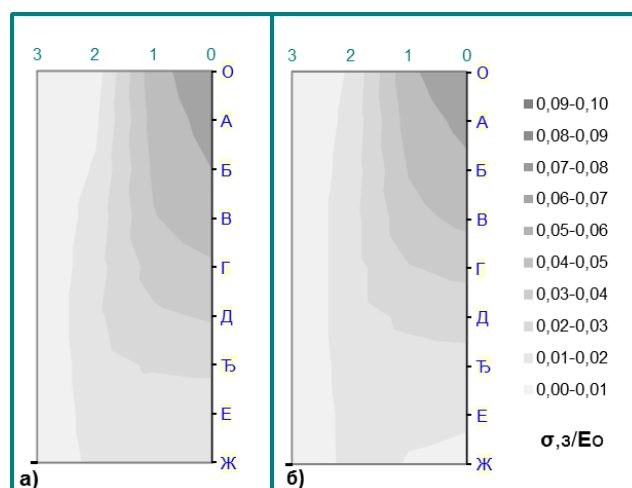
Слика 4.59 Слагање расподеле података са мерних сонди и нормалне (Гаусове) расподеле за експеримент 0VQ40h17

Оптерећење зида умирујућег базена, како од средњих притисака (слика 4.60), тако и од пулзација (слика 4.61), код модела ГФ-0V је веома слично као и на моделу ГФ-0M. Међутим добијени меродавни утицаји, који су и овде на низводном крају умирујућег базена, су ипак нешто већи.

Разлог томе је вероватно нешто већа концентрација овог оптерећења на моделу ГФ-0V, него на моделу ГФ-0M, баш у пресецима у којима се јављају највећи утицаји, за средње притиске на крају, а за пулзације на почетку базена.



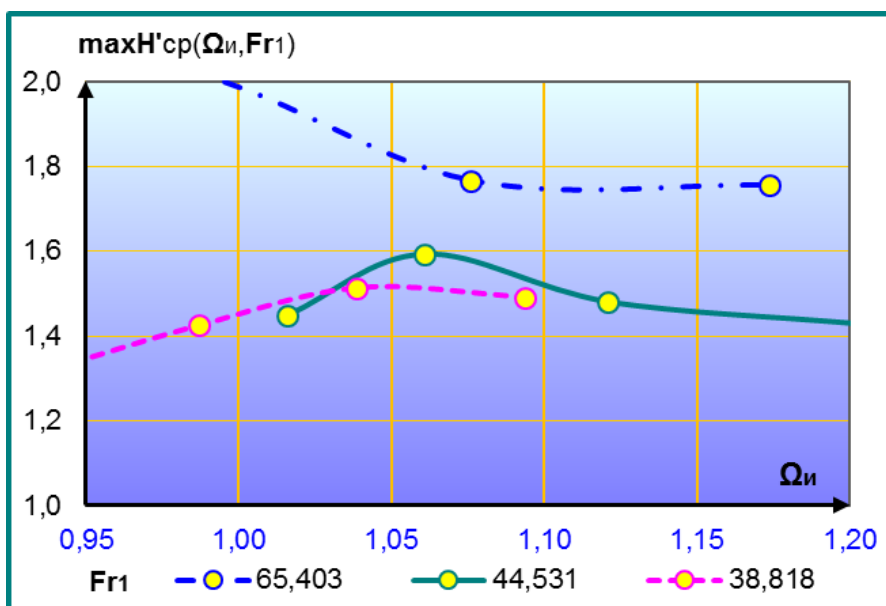
Слика 4.60 Расподела средњих притисака на зид базена, а) при експерименту 0MQ40h17 и б) при експерименту 0VQ40h17



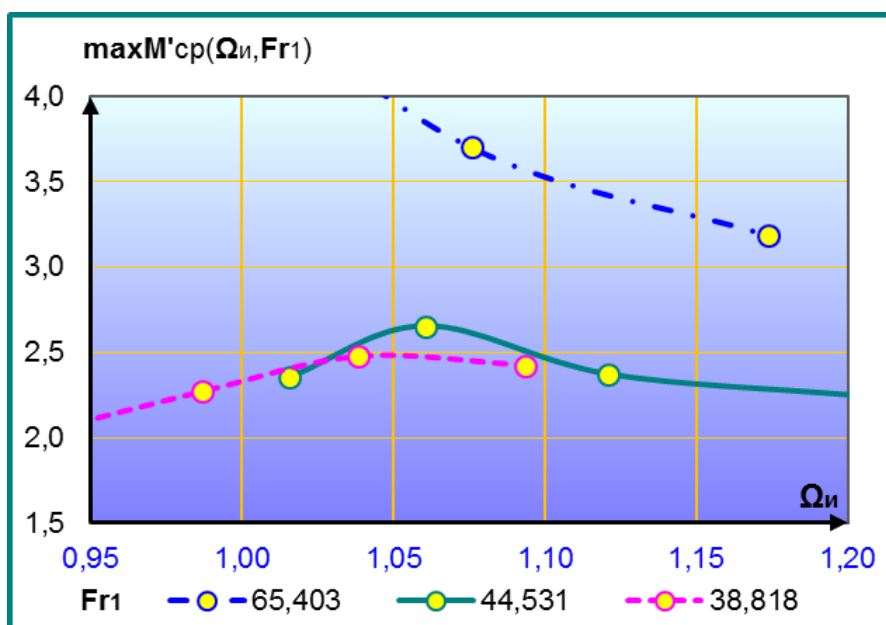
Слика 4.61 Расподела пулзационих притисака на зид базена, а) при експерименту 0MQ40h17 и б) при експерименту 0VQ40h17

Анализирани су максимални утицаји од средњих притисака за различите експерименте на моделу ГФ-0V (слике 4.62 и 4.63). Може се закључити да су за ниже протоке, односно веће Фрудове бројеве у суженом пресеку, ови утицаји знатно већи, док при већим протицајима, они конвергирају вредностима од око 1,6 за хоризонталне силе, и 2,5 за

моменте. У односу на модел ГФ-0М, разлика утицаја у зависности од Фрудовог броја је на моделу ГФ-0V израженија.

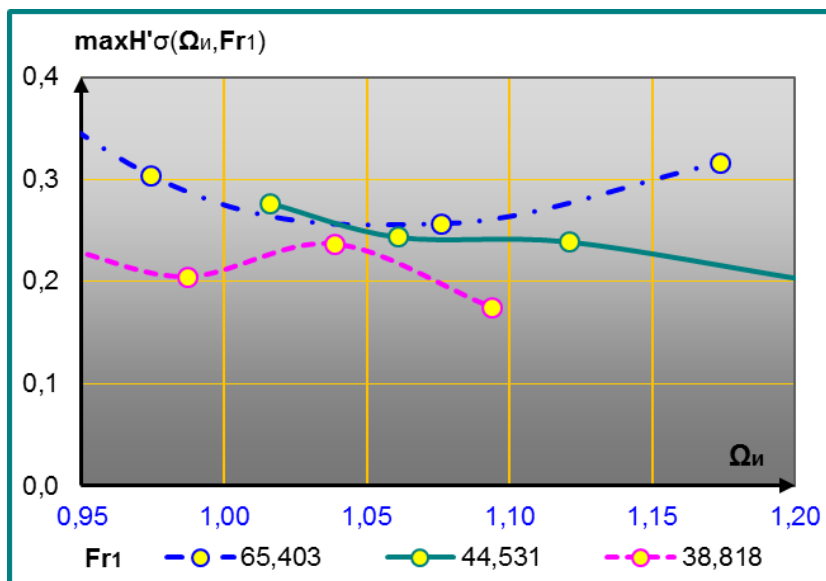


Слика 4.62 Промена максималне хоризонталне силе у уклештењу зида услед средњих притисака, у зависности од потопљености скока и Фрудовог броја на моделу ГФ-0V

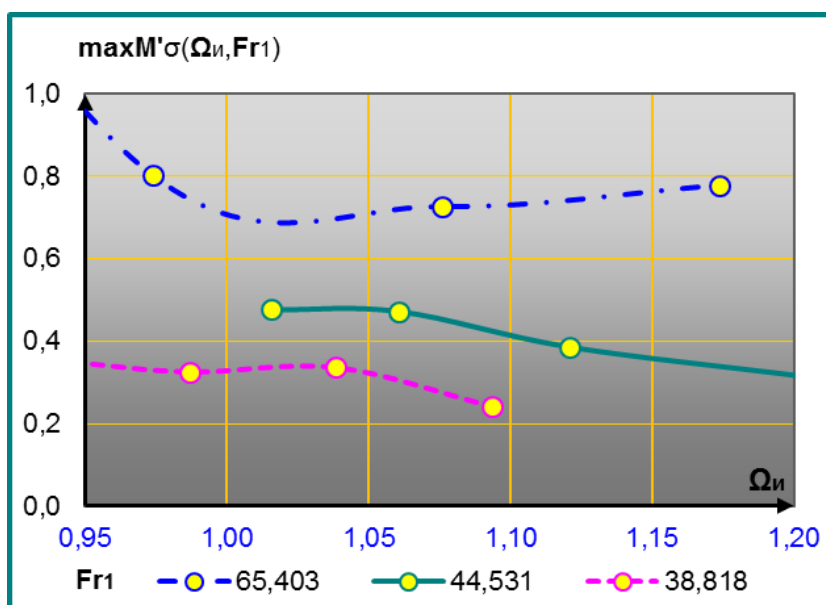


Слика 4.63 Промена максималног момента у уклештењу зида услед средњих притисака, у зависности од потопљености скока и Фрудовог броја на моделу ГФ-0V

За разлику од експеримената на моделу ГФ-0М, понашање максималних утицаја од пулзација за различите експерименте на моделу ГФ-0V је нешто једноставније (слике 4.64 и 4.65).



Слика 4.64 Промена максималне хоризонталне силе у уклештењу зида услед пулзација у зависности од потопљености скока и Фрудовог броја на моделу ГФ-0V



Слика 4.65 Промена максималног момента у уклештењу зида услед пулзација у зависности од потопљености скока и Фрудовог броја на моделу ГФ-0V

Максималне хоризонталне сила од пулзација су мање од 0,35, а максимални momenti су мањи од 0,8, ако је хидраулички скок у базену

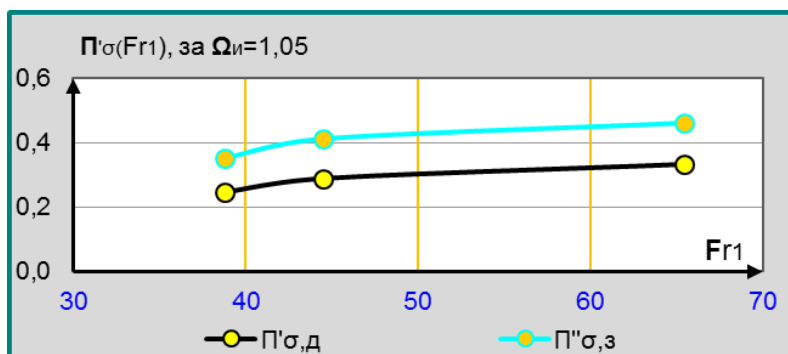
потопљен. Треба приметити и да се утицаји од пулзација веома мало мењају са променом потопљености хидрауличког скока.

У табели 4.5 приказани су коефицијенти пригушења пулзационе силе у дну умирујућег базена, током експеримената на моделу ГФ-0V.

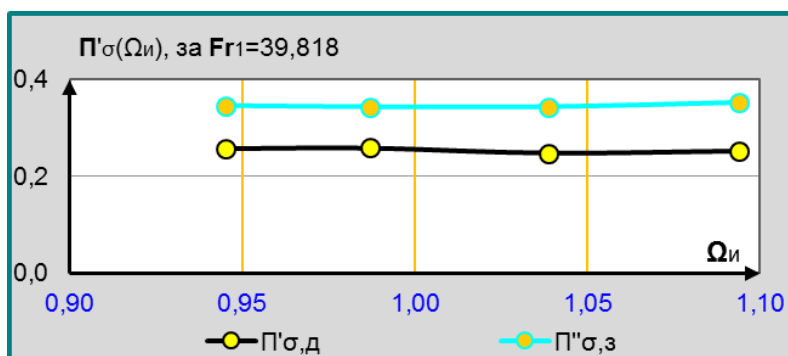
Табела 4.5 Коефицијенти пригушења пулзационе силе на моделу ГФ-0V

$\Pi'\sigma$	$\Omega_{и}$	0,8397	0,9740	1,0758	1,1739
$Fr_1 =$	65,403	0,3631	0,3365	0,3330	0,3337
$\Pi'\sigma$	$\Omega_{и}$	1,0157	1,0606	1,1208	1,2028
$Fr_1 =$	44,531	0,2957	0,2894	0,2847	0,2968
$\Pi'\sigma$	$\Omega_{и}$	0,9451	0,9871	1,0386	1,0938
$Fr_1 =$	38,818	0,2580	0,2587	0,2472	0,2522

Парцијалном анализом утицаја потопљености хидрауличког скока, $\Omega_{и}$, и Фрудовога броја Fr_1 на пригушење пулзационих сила (слике 4.66 и 4.67) може се уочити да и на овом моделу превлађује утицај Фрудовога броја, али мање изражено него на моделу ГФ-0M.



Слика 4.66 Промена коефицијента пригушења пулзационе силе на моделу ГФ-0V у зависности од Фрудовога броја, при истој потопљености хидрауличког скока



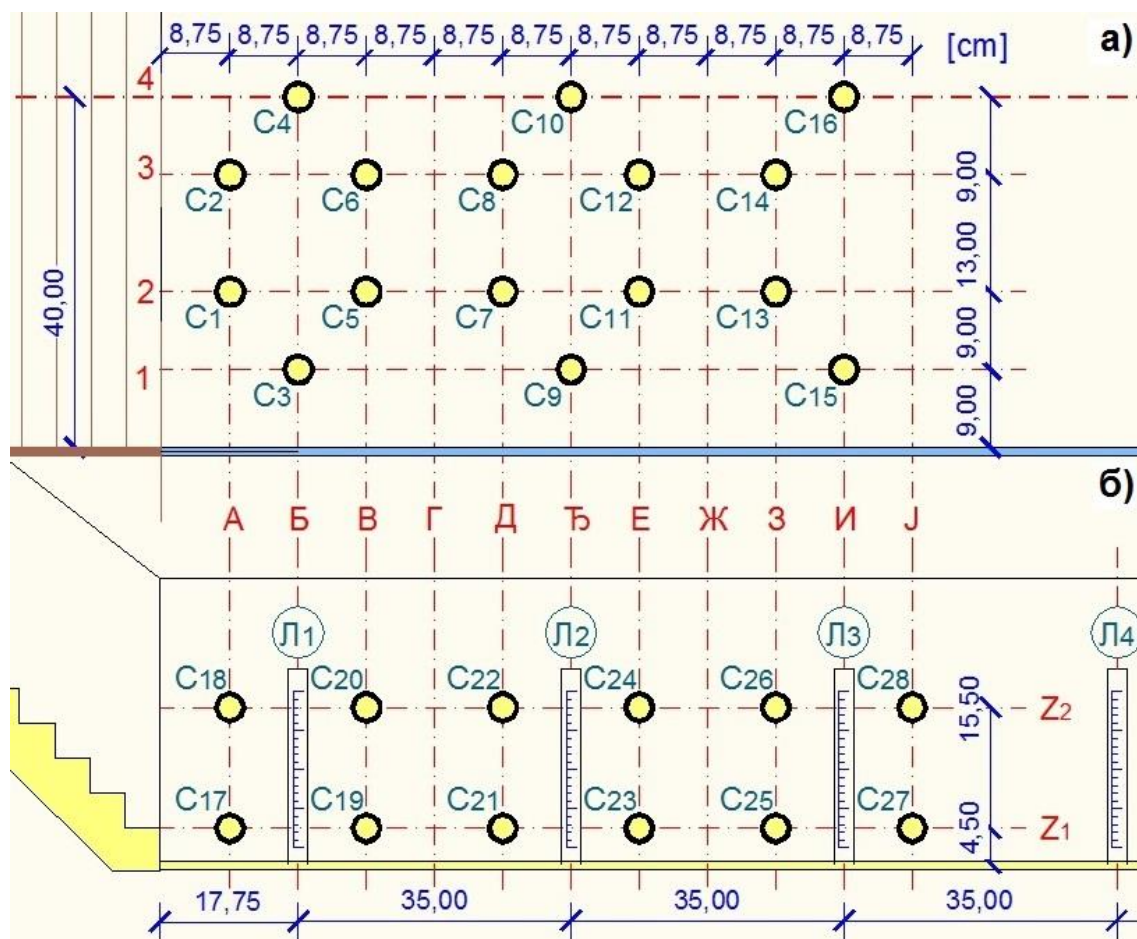
Слика 4.67 Промена коефицијента пригушења пулзационе силе на моделу ГФ-0V у зависности од потопљености хидрауличког скока при истом Фрудовом броју

На моделу ГФ-0V нису регистроване доминантне учесталости утицаја на елементе конструкције.

4.9 Резултати мерења на моделу ГФ-1M

Модел ГФ-1M је умирујући базен иза непризматичног брзотока са мањим степеницима. Суужење брзотока је симетрично под углом од 5° (слика 4.3). Преливна ивица на почетку брзотока је $B_{II} = 98$ cm, а ширина умирујућег базена је $B_C = 80$ cm, дакле суужење ширине на брзотоку је 18,37%. Прелаз из непризматичног брзотока у призматичан умирујући базен није хидраулички обликован. Узорковање је вршено са укупно 28 сонди, од којих су се 16 налазиле у десној половини дна, а 12 на десном зиду базена.

Шема постављања сонди је приказана на слици 4.68.



Слика 4.68 Распоред мерних сонди и лењира на моделу ГФ-1M

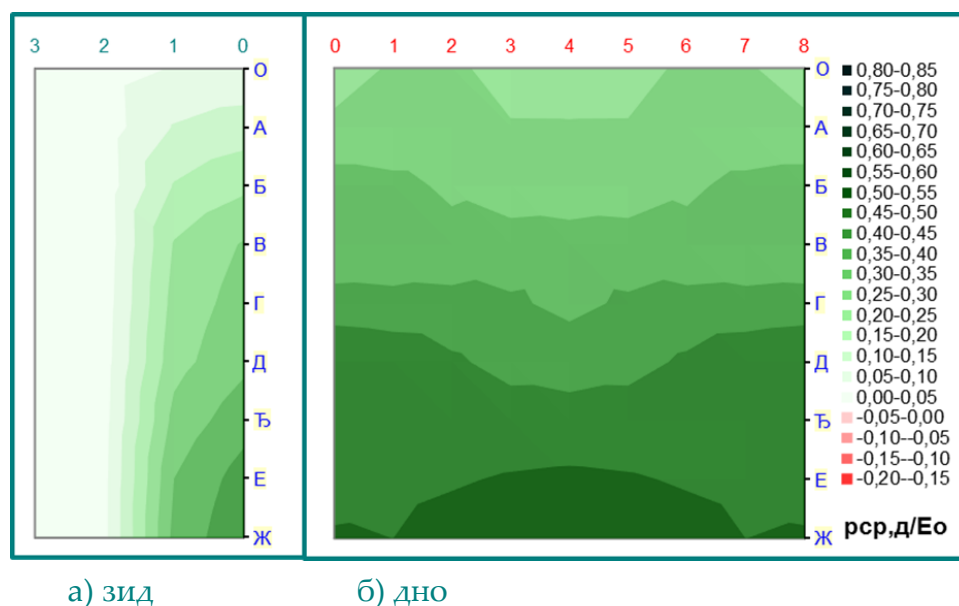
а) дно, б) зид

У табели 4.6 приказани су најважнији резултати на моделу ГФ-1М.

Табела 4.6 Резултати обраде мерних података на моделу ГФ-1М

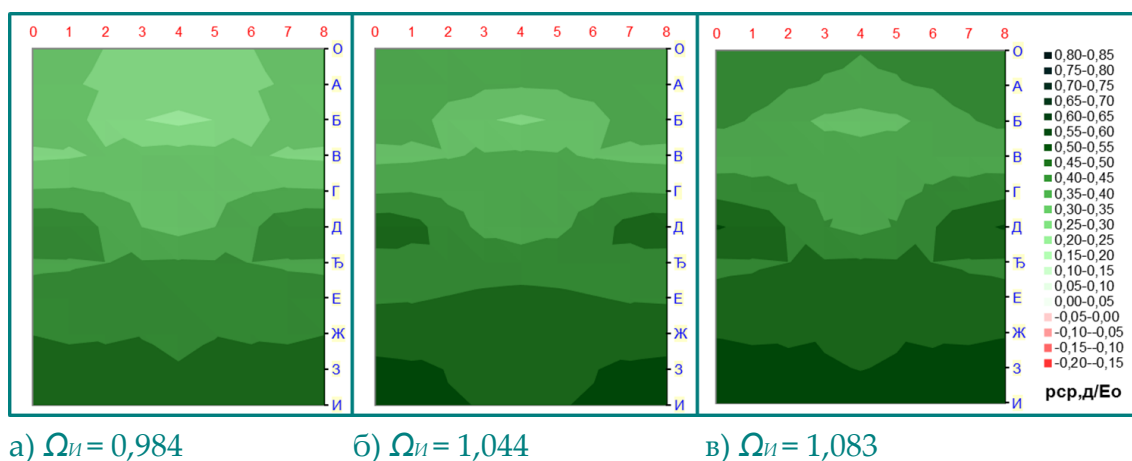
Модел 1М-	Q20h11	Q20h12	Q20h13	Q20h14	Q40h14	Q40h15	Q40h16	Q40h17	Q60h18	Q60h19	Q60h20	Q60h21
L_c [cm]	55,00	55,00	55,00	55,00	75,00	75,00	75,00	75,00	95,00	95,00	95,00	95,00
Q [l/s]	20,60	20,60	20,60	20,60	40,15	40,15	40,15	40,15	59,30	59,30	59,30	59,30
$h_{дв}$ [cm]	11,00	12,00	13,00	14,00	14,00	15,00	16,00	17,00	18,00	19,00	20,20	21,00
E_0 [cm]	28,52	28,52	28,52	28,52	34,04	34,04	34,04	34,04	41,19	41,19	41,19	41,19
Fr_1	50,671	50,671	50,671	50,671	32,882	32,882	32,882	32,882	29,332	29,332	29,332	29,332
Ω_l	0,9159	1,0093	1,1840	1,2340	0,8736	0,9920	1,0837	1,1485	0,9541	0,9839	1,0439	1,0833
N	0,9556	0,9575	0,9492	0,9477	0,9454	0,9603	0,9585	0,9626	0,9201	0,9564	0,9620	0,9627
$F_{ср,д}$	0,9086	0,9431	0,9860	0,9965	0,6687	0,8273	0,8782	0,8993	0,5727	0,7906	0,8213	0,8348
$F^*_{\sigma,д}$	0,0886	0,0806	0,0682	0,0616	0,1042	0,0834	0,0745	0,0682	0,0927	0,0733	0,0700	0,0670
$F^*_{\sigma,д}$	0,0879	0,0809	0,0680	0,0623	0,1046	0,0829	0,0743	0,0684	0,0936	0,0732	0,0699	0,0671
$F_{ср,ду}$	0,7674	0,8300	0,8962	0,9196	0,4537	0,6733	0,7569	0,7977	0,4080	0,6896	0,7472	0,7758
$F^*_{\sigma,ду}$	0,1483	0,1307	0,1121	0,0980	0,1623	0,1498	0,1284	0,1158	0,1368	0,1334	0,1219	0,1166
$F^*_{\sigma,ду}$	0,1473	0,1312	0,1112	0,0979	0,1664	0,1469	0,1264	0,1153	0,1415	0,1316	0,1220	0,1163
$F_{ср,дн}$	1,0498	1,0562	1,0757	1,0733	0,8837	0,9814	0,9995	1,0009	0,7373	0,8917	0,8954	0,8937
$F^*_{\sigma,дн}$	0,0766	0,0758	0,0669	0,0621	0,1125	0,0721	0,0740	0,0678	0,1153	0,0640	0,0652	0,0650
$F^*_{\sigma,дн}$	0,0749	0,0763	0,0632	0,0633	0,1167	0,0695	0,0718	0,0675	0,1205	0,0622	0,0667	0,0654
$\max H^*_{ср,з}$	1,6343	1,5780	1,4992	1,5578	1,4607	1,3915	1,4033	1,4236	1,0645	1,5470	1,4622	1,5015
$\max M^*_{ср,з}$	3,0111	2,7215	2,4814	2,5848	2,3331	2,1447	2,1599	2,2028	1,4823	2,5298	2,3219	2,4162
$\max H^*_{\sigma,з}$	0,3161	0,3968	0,2836	0,2349	0,3115	0,2995	0,3136	0,2443	0,3407	0,3184	0,2704	0,2548
$\max M^*_{\sigma,з}$	0,6531	0,8985	0,6258	0,5085	0,6636	0,4842	0,4137	0,3939	0,6188	0,3741	0,3277	0,3171

Расподела средњих притисака се за $Fr_1 > 30$, уклапа у очекивану слику тако да сужени пресек остаје на самом почетку умирујућег базена (слика 4.69). За мање Фрудове бројеве, односно веће протоке, сужени пресек се помера низводно, односно улази унутар базена и то готово независно од потоцљености хидрауличког скока (слика 4.70).



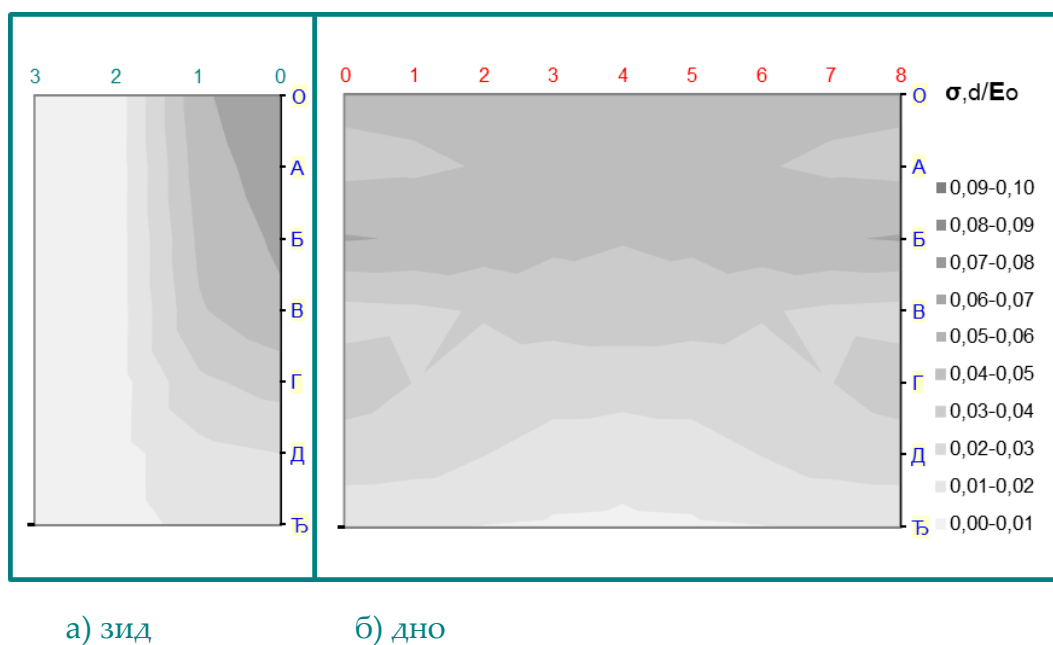
Слика 4.69 Средњи притисци за експеримент 1MQ40h15 ($Fr_1 = 34,04$)

а) дно, б) зид



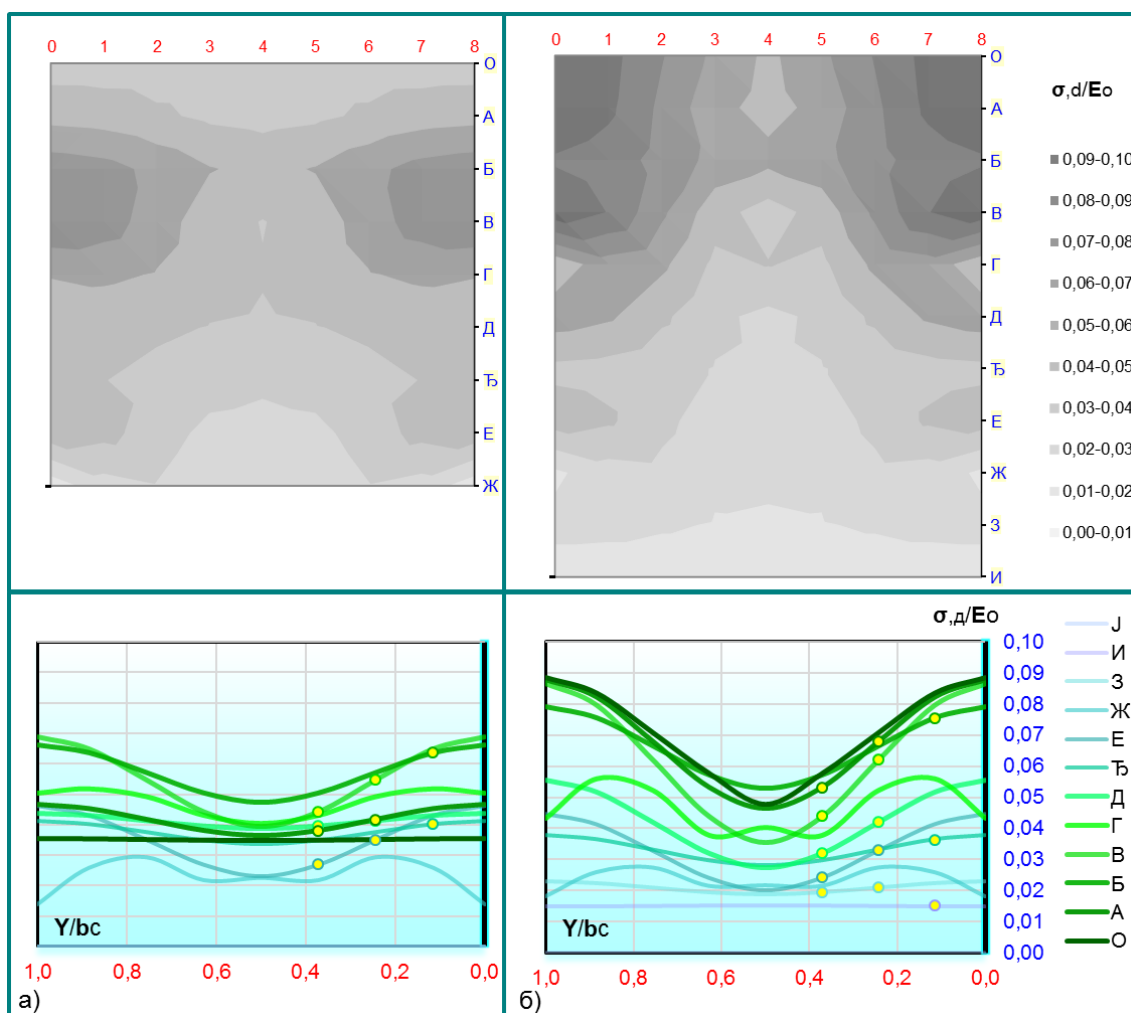
Слика 4.70 Средњи притисци за експерименте 1MQ60 ($Fr_1 = 29,332$) при различитим потољеностима хидрауличког скока

Пулзације су за веће Фрудове бројеве равномерно распоређене у попречним пресецима и незнатно су израженије на узводном делу базена, односно у близини суженог пресека (слика 4.71).



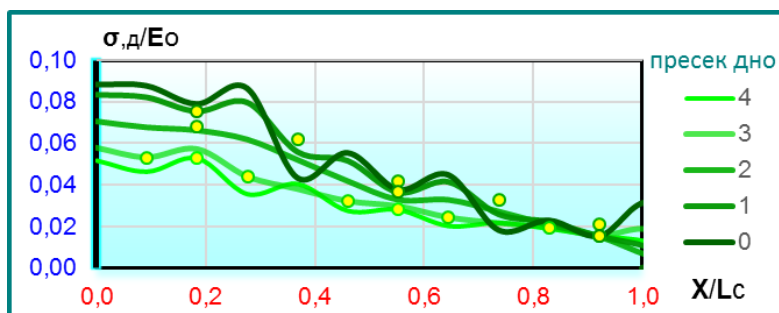
Слика 4.71 Пулзације за експеримент 1MQ20h11 ($Fr_1 = 50,67$) а) дно, б) зид

Међутим, са смањењем Фрудовог броја, односно са повећањем протока, долази до све интензивније прерасподеле пулзација у попречном пресеку, и то израженије у узводном, него у низводном, делу умирујућег базена (слика 4.72).



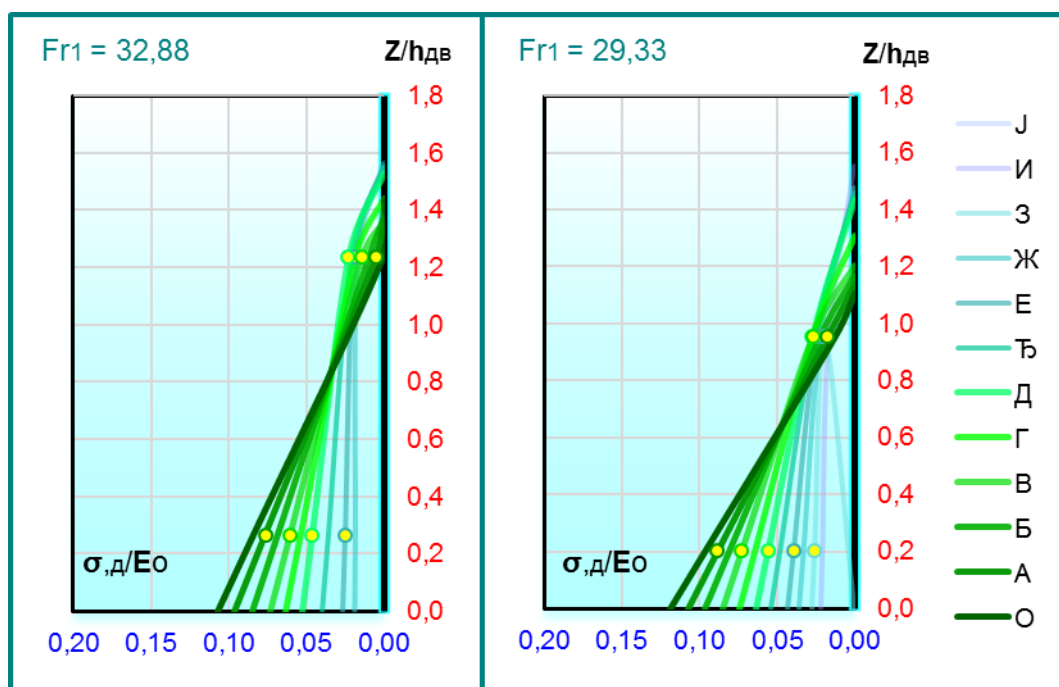
Слика 4.72 Пулзације на дно за експерименте а) 1MQ40h14 ($Fr_1 = 32,88$)
и б) 1MQ60h19 ($Fr_1 = 29,33$)

Ова појава карактерише умирујуће базене иза непризматичног брзотока, јер ништа слично није регистровано на моделима ГФ-0М и ГФ-0V. Како је прерасподела пулзација на овом моделу готово неприметна за веће Фрудове бројеве ($Fr_1 > 40$), док за мање постаје све интензивнија, може се очекивати да је она изазвана не само сложеним попречним компонентама струјања насталим на брзотоку, већ и интензитетима хидродинамичке силе са узводне и хидростатичке силе са низводне стране, које се уравнотежују хидрауличким скоком. На подужном дијаграму пулзација на дно умирујућег базена (слика 4.73), уочава се да са порастом дубине воде дуж базена интензитет пулзација опада, што је у складу са раније уоченим „гушењем“ пулзација у дубокој води.



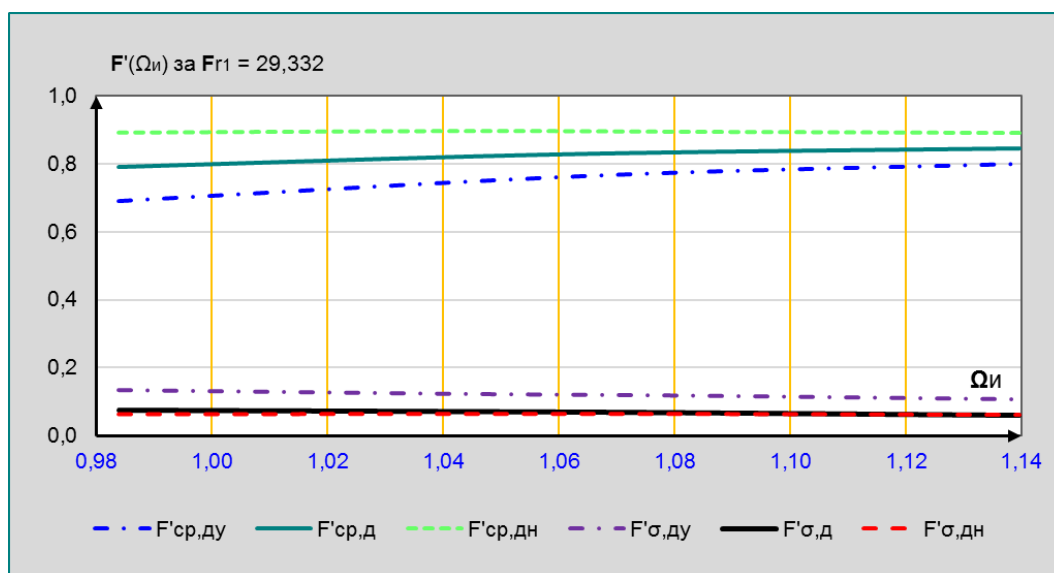
Слика 4.73 Подужна расподела пулзације на дну базена за експеримент 1MQ60h20, $Fr_1 = 29,33$ и $\Omega_{И} = 1,044$

Повећање пулзационих притисака на дну базена, у близини бокова свакако мора имати и утицај на расподелу пулзационих притисака на зидове. Са дијаграма на слици 4.74, може се уочити да се на узводном делу зида базена, посебно у пресецима ближе дну, величина пулзационих притисака значајно увећава. Такође може се уочити да пулзације изазивају веће запљускивање зидова базена изнад средњег нивоа воде код течења са нижим вредностима Фрудовог броја.

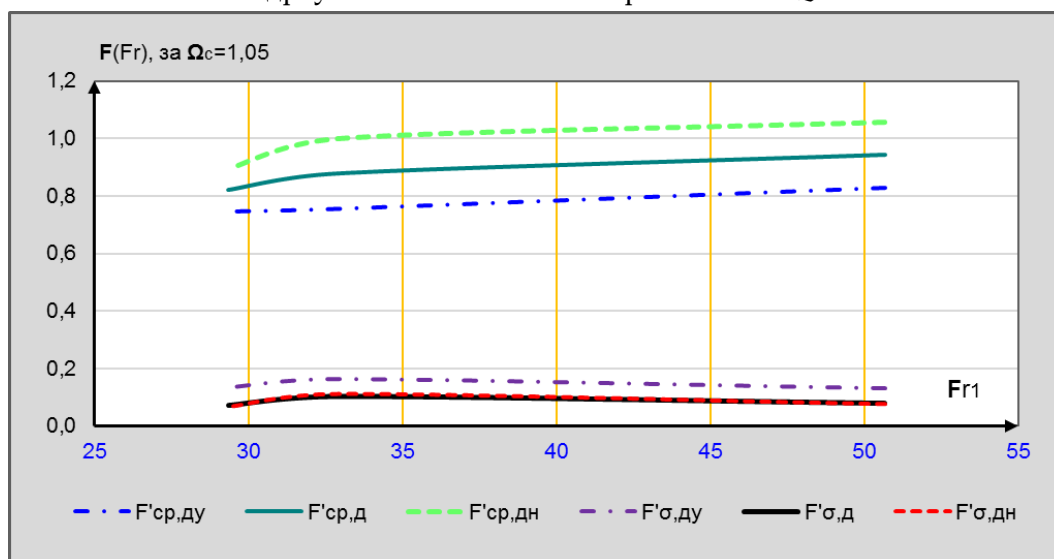


Слика 4.74 Пулзације на зидове умирујућег базена за различите вредности Фрудовог броја а) експеримент 1MQ40h14, $Fr_{1,a} = 32,88$, $\Omega_{И,a} = 1,15$ и б) експеримент 1MQ60h22, $Fr_{1,b} = 29,33$ и $\Omega_{И,b} = 1,08$

На дијаграмима најважнијих утицаја на дну базена при константном протоку $Q = 60 \text{ l/s}$, односно Фрудовом броју $Fr_1 = 29,332$ (слика 4.75), и при константној потоцљености хидрауличког скока од $\Omega_{и} = 1,05$ (слика 4.76), може се уочити да је Фрудов број нешто значајнији параметар, посебно при већим вредностима $\Omega_{и}$.

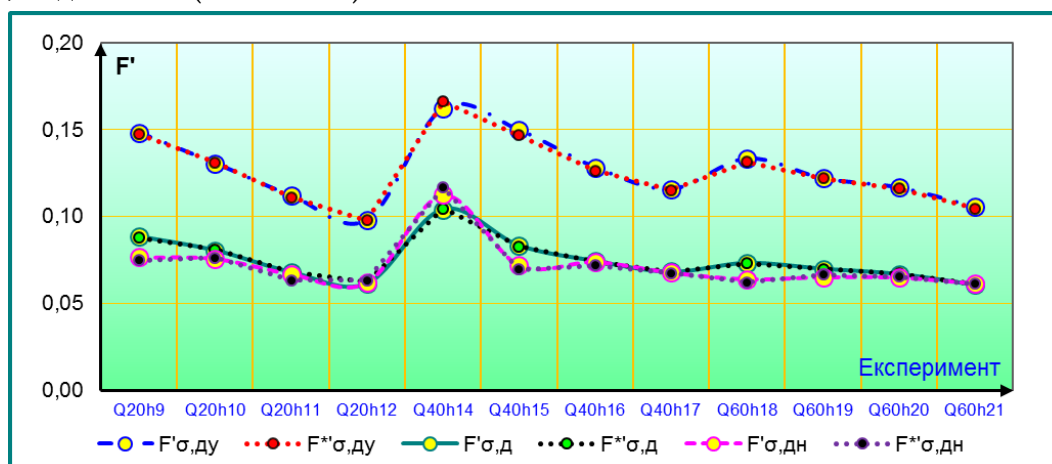


Слика 4.75 Промена утицаја у базену, при варијацији потоцљености хидрауличког скока за експерименте 1MQ60



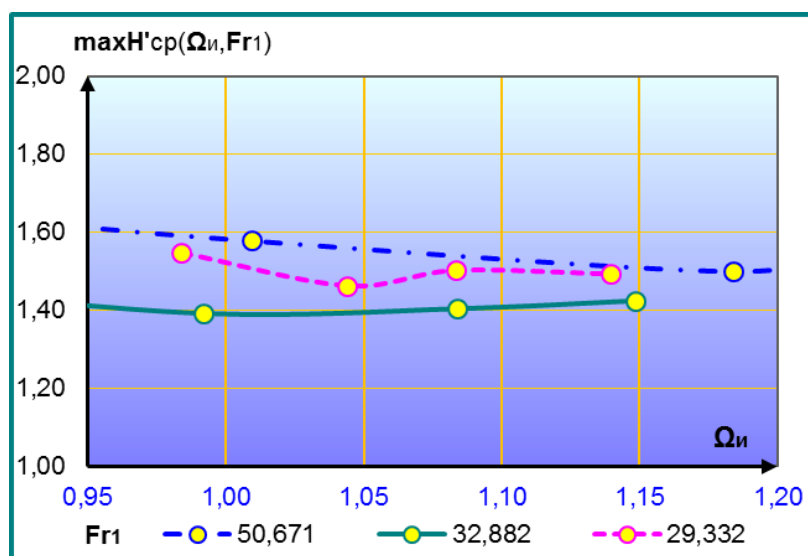
Слика 4.76 Промена утицаја у базену, при варијацији Фрудовог броја и при константној потоцљености хидрауличког скока у базену за модел ГФ-1М

Поређењем сила од средњих притисака и пулзација срачунатих директном статичком методом са силама добијеним на основу претпоставке о нормалној расподели притисака добијено је слагање од 94,44 до 100% (слика 4.77)



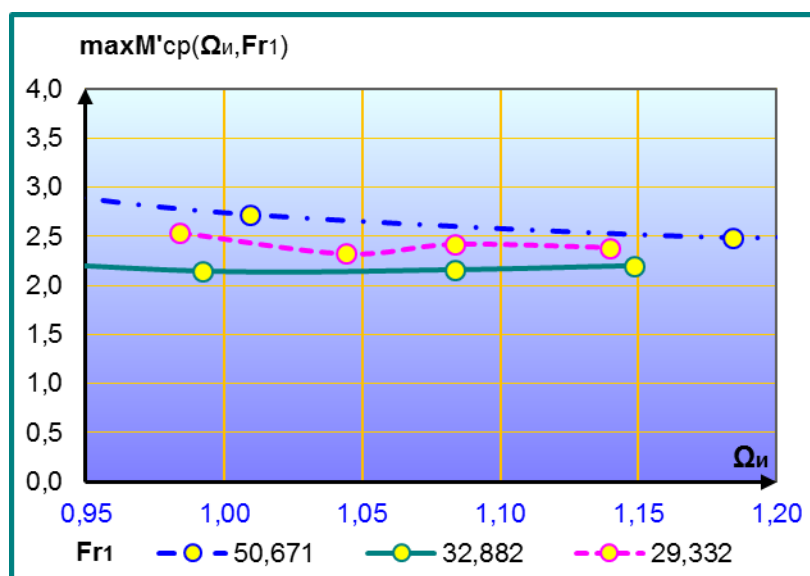
Слика 4.77 Слагање сила од пулзација (F') добијених директном методом, са силама (F^*) добијеним поступком из [2], на моделу ГФ-1М

Карактер оптерећења на зид базена од средњих притисака није се значајније променио у односу на моделе ГФ-0М и ГФ-0В. Код оптерећења од пулзација забележен је пораст максималних утицаја, али првенствено у зони суженог пресека, док у зони меродавних утицаја на низводном крају базена нема значајних промена у односу на претходне моделе.

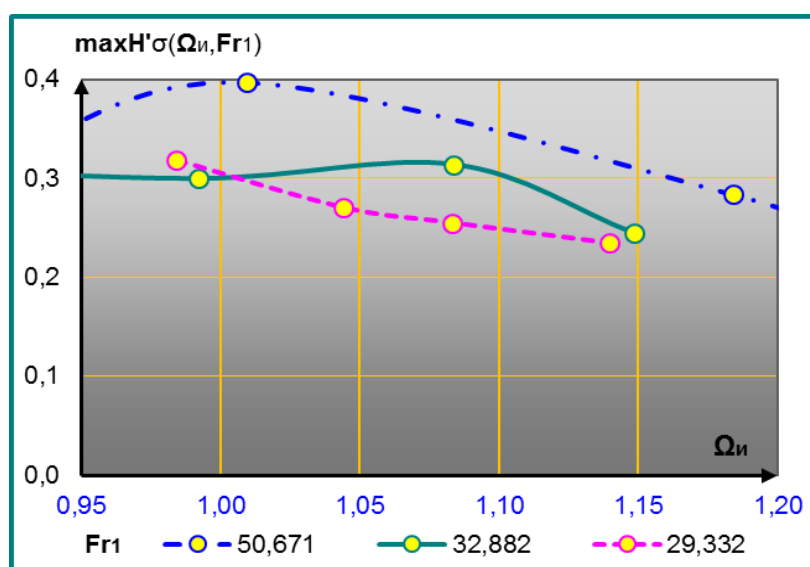


Слика 4.78 Промена максималне хоризонталне силе у уклештењу зида услед средњих притисака, у зависности од потопљености скока и Фрудовог броја на моделу ГФ-1М.

Из анализе максималних утицаја од средњих притисака на зид базена, за различите експерименте на моделу ГФ-1М (слике 4.78 и 4.79) може се закључити да су њихове вредности прилично уједначене за све потоњености хидрауличког скока, као и да веома благо расту са порастом Фрудовог броја у суженом пресеку. Опсег вредности максималне хоризонталне силе је од 1,4 до 1,6 а за моменте у уклештењу од 2,0 до 2,85.

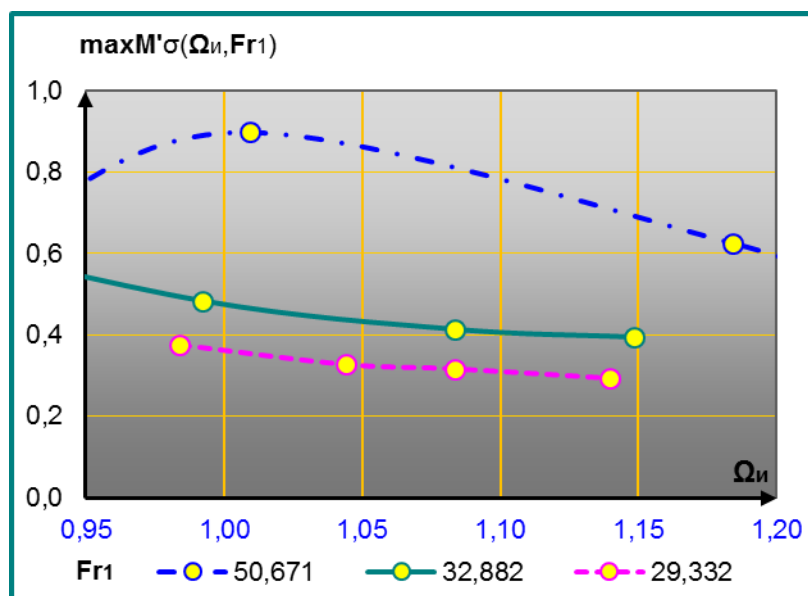


Слика 4.79 Промена максималног момента у уклештењу зида услед средњих притисака, у зависности од потоњености скока и Фрудовог броја на моделу ГФ-1М.



Слика 4.80 Промена максималне хоризонталне силе у уклештењу зида услед пулзација у зависности од потоњености скока и Фрудовог броја на моделу ГФ-1М

Максимални утицаји од пулзација за различите експерименте је приказани су на сликама 4.80 и 4.81. Може се приметити да ови утицаји углавном опадају са повећањем потоппљености хидрауличког скока, а да расту са повећањем Фрудовог броја у суженом пресеку, нарочито за $Fr_1 > 40$.



Слика 4.81 Промена максималног момента у уклештењу зида услед пулзација у зависности од потоппљености скока и Фрудовог броја на моделу ГФ-1М

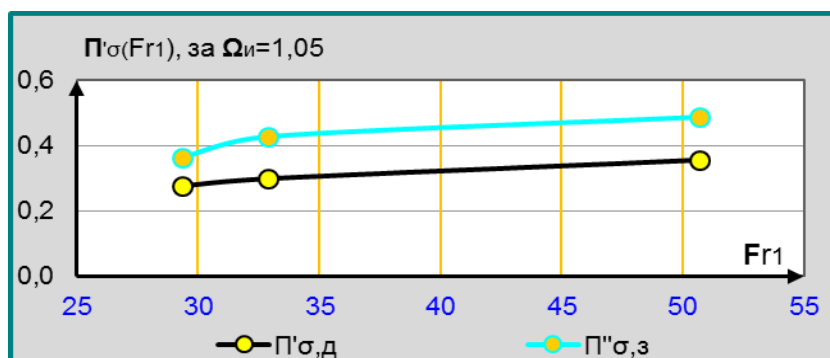
У табели 4.7 приказани су ови коефицијенти пригушења у дну умирујућег базена, током експеримената на моделу ГФ-1М. Поређењем са резултатима са модела ГФ-0М и ГФ-0V, уочава се да је пригушење сада нешто слабије.

Табела 4.7 Коефицијенти пригушења пулзационе силе на моделу ГФ-1М

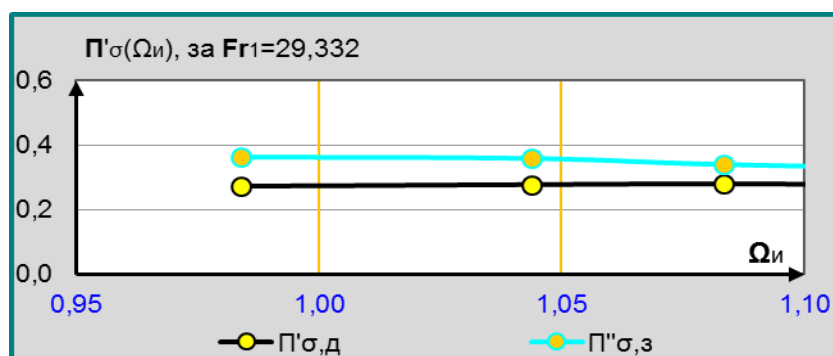
$\Pi'\sigma$	Ω_i	0,9159	1,0093	1,1840	1,2340
$Fr_1 =$	50,671	0,3505	0,3547	0,3382	0,3422
$\Pi'\sigma$	Ω_i	0,8736	0,9920	1,0837	1,1485
$Fr_1 =$	32,882	0,3254	0,3027	0,2993	0,2973
$\Pi'\sigma$	Ω_i	0,9839	1,0439	1,0833	1,1396
$Fr_1 =$	29,332	0,2711	0,2774	0,2800	0,2753

Када се изврши парцијална анализа утицаја потоппљености хидрауличког скока, Ω_i (слике 4.82), и Фрудовог броја, Fr_1 (слике 4.83) на пригушење пулзационих сила, може се видети да пригушење практично не зависи од потоппљености хидрауличког скока у умирујућем базену, а да

значајно расте са порастом Фрудовог броја у суженом пресеку, што се слаже са анализама на моделима ГФ-0М и ГФ-0V.

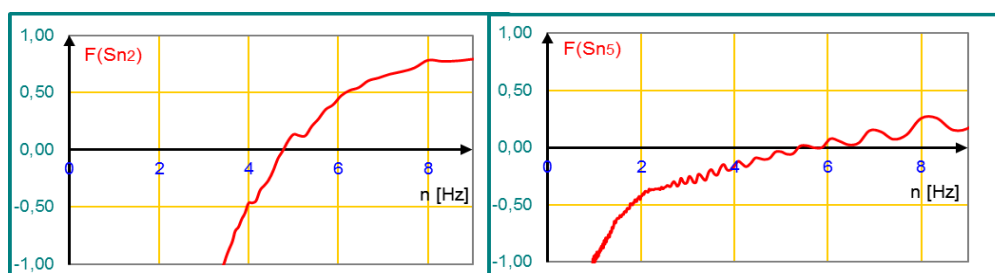


Слика 4.82 Промена коефицијента пригушења пулзационе силе на моделу ГФ-1М у зависности од Фрудовог броја, при истој потопљености хидрауличког скока



Слика 4.83 Промена коефицијента пригушења пулзационе силе у зависности од потопљености хидрауличког скока при истом Фрудовом броју на моделу ГФ-1М

Доминантне фреквенце при којима постоји увећање утицаја забележене су само у експерименту 1MQ60h18. На слици 4.84 се може приметити да за узводни део како дна тако и зида постоји доминантан тон од око 8 Hz.



а) узводна плоча дна базена

б) узводна део зида базена

Слика 4.84 Доминантне фреквенце утицаја на узводни део базена у експерименту: 1MQ60h18 ($\Omega_{и} = 0,954$)

4.10 Резултати мерења на моделу ГФ-1V

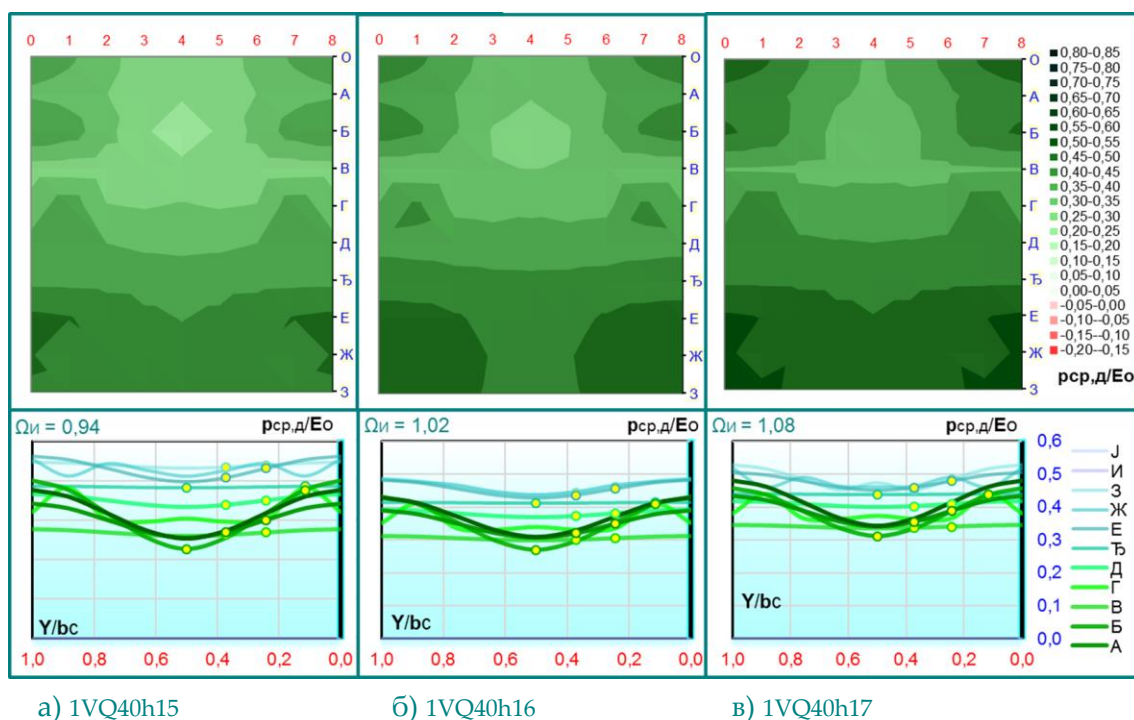
Умирујући базен модел ГФ-1V је потпуно идентичан моделу ГФ-1M. Разлика је у величини степеника на брзотоку, који су два пута већи. Шема постављања мерних сонди и мерна опрема су исти као и за модел ГФ-1M (слика 4.68). Добијени резултати приказани су у табели 4.8.

Табела 4.8 Резултати обраде мерних података на моделу ГФ-0V

Модел 1V-	Q20h9	Q20h10	Q20h11	Q20h12	Q40h14	Q40h15	Q40h16	Q40h17	Q60h18	Q60h19	Q60h20	Q60h21
Lc [cm]	55,00	50,00	50,00	50,00	80,00	80,00	80,00	80,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Q [l/s]	20,00	20,00	20,00	20,00	40,22	40,22	40,22	40,22	60,00	60,00	60,00	60,00
h _{дв} [cm]	9,00	10,00	11,00	12,00	14,00	15,00	16,00	17,00	18,00	19,00	20,00	21,00
E ₀ [cm]	33,35	33,35	33,35	33,35	35,38	35,38	35,38	35,38	42,38	42,38	42,38	42,38
Fr ₁	66,937	66,937	66,937	66,937	34,974	34,974	34,974	34,974	30,359	30,359	30,359	30,359
Ω _и	0,6762	0,9055	0,9559	1,1614	0,8973	0,9232	1,0206	1,0838	0,9402	0,9924	1,0447	1,0969
N	0,8777	0,9454	0,9543	0,9631	0,9362	0,9493	0,9563	0,9646	0,9358	0,9424	0,9606	0,9693
F ^{ср,д}	0,8139	0,9084	0,9126	0,9896	0,7057	0,8221	0,8450	0,8555	0,6760	0,7421	0,7721	0,7438
F ^{σ,д}	0,1232	0,1043	0,0921	0,0721	0,1133	0,0896	0,0806	0,0738	0,0903	0,0763	0,0684	0,0667
F ^{*σ,д}	0,1231	0,1051	0,0925	0,0733	0,1136	0,0897	0,0810	0,0741	0,0908	0,0763	0,0685	0,0669
F ^{ср,ду}	0,6735	0,8125	0,8310	0,9225	0,5205	0,6962	0,7433	0,7711	0,6122	0,7194	0,7697	0,7431
F ^{σ,ду}	0,2193	0,1759	0,1516	0,1153	0,1985	0,1628	0,1427	0,1277	0,1647	0,1419	0,1262	0,1217
F ^{*σ,ду}	0,2202	0,1775	0,1536	0,1173	0,1991	0,1616	0,1424	0,1275	0,1653	0,1405	0,1244	0,1214
F ^{ср,дн}	0,9543	1,0043	0,9943	1,0568	0,8910	0,9481	0,9467	0,9399	0,7399	0,7647	0,7746	0,7445
F ^{σ,дн}	0,0813	0,0953	0,0873	0,0731	0,0921	0,0675	0,0650	0,0622	0,0711	0,0595	0,0568	0,0550
F ^{*σ,дн}	0,0832	0,0951	0,0865	0,0738	0,0935	0,0663	0,0664	0,0641	0,0718	0,0563	0,0546	0,0535
maxH ^{ср,з}	1,1877	1,8585	1,8925	1,8087	1,6728	1,5772	1,5552	1,5562	1,3397	1,5690	1,5149	1,6160
maxM ^{ср,з}	2,8512	3,8670	3,6719	3,3698	2,8490	2,5829	2,5163	2,5175	2,1067	2,6424	2,5011	2,7541
maxH ^{σ,з}	0,2817	0,3644	0,3568	0,3518	0,3013	0,3349	0,2904	0,2558	0,2763	0,2625	0,2595	0,2835
maxM ^{σ,з}	0,7739	0,9356	0,7387	0,7962	0,6103	0,5079	0,4521	0,3959	0,4147	0,3563	0,3318	0,3367

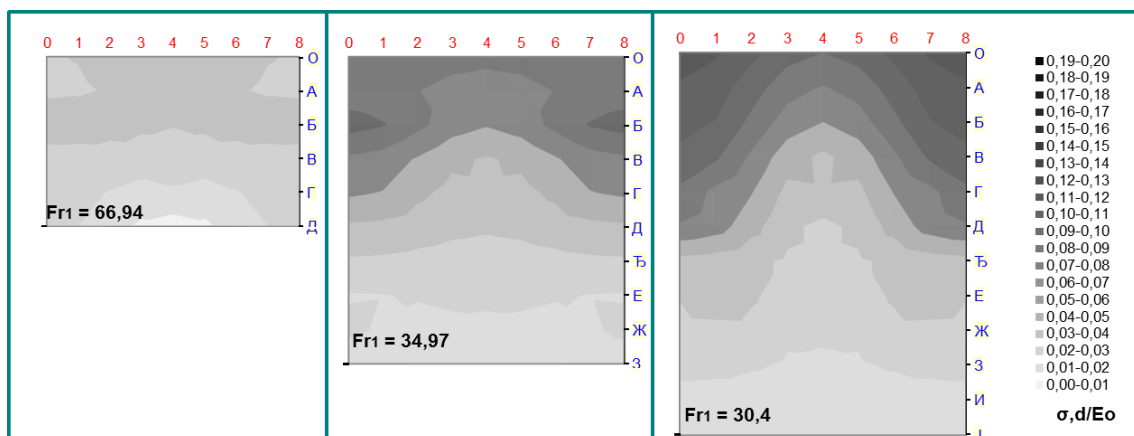
Особеност коју имају сви експерименти са већим степеницима на брзотоку је да се брзина тока, због већих степеника, преусмерава у хоризонтални правац, па је зона скретних притисака слабије изражена (слика 4.51). Додатна карактеристика која се уочава на моделу ГФ-1V је смањење силе тока, посебно при вишим Фрудовим бројевима у суженом пресеку, па се хидраулички скок потапа и са плићом доњом водом. Последица тога је велика варијација дужине умирујућег базена (слика 4.86). Тако је за $Fr_1 > 60$, умирујући базен готово дупло краћи него за $Fr_1 < 35$.

Са становишта прерасподеле средњих притисака у умирујућем базену, и овде важе сва запажања као и код модела ГФ-1M. Положај суженог пресека је практично независан од потопљености хидрауличног скока (слика 4,85). Такође на слици се може уочити и да у суженом пресеку долази до прерасподеле средњих притисака који се благо увећавају са удаљењем од осе базена, односно уз зидове.



Слика 4.85 Средњи притисци у дну умирујућег базена за $Fr_1 = 34,97$ и при различитим вредностима потопљености хидрауличког скока

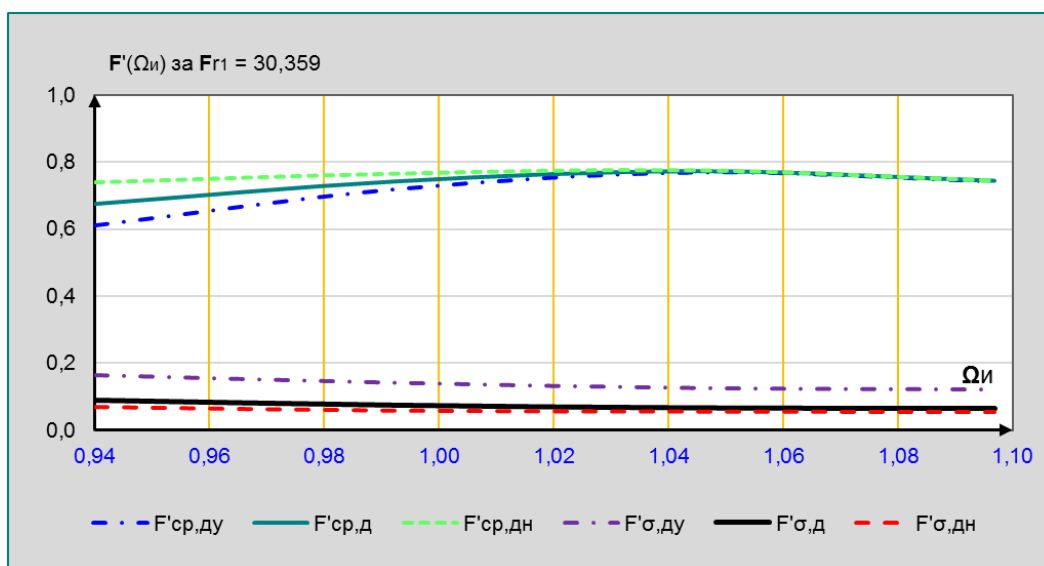
Прерасподела пулзација је слична као и на моделу ГФ-1М. За велике Фрудове бројеве ($Fr_1 > 60$), нема значајнијег померања ка зидовима, док за ниже вредности то постаје све израженије (слика 4.86).



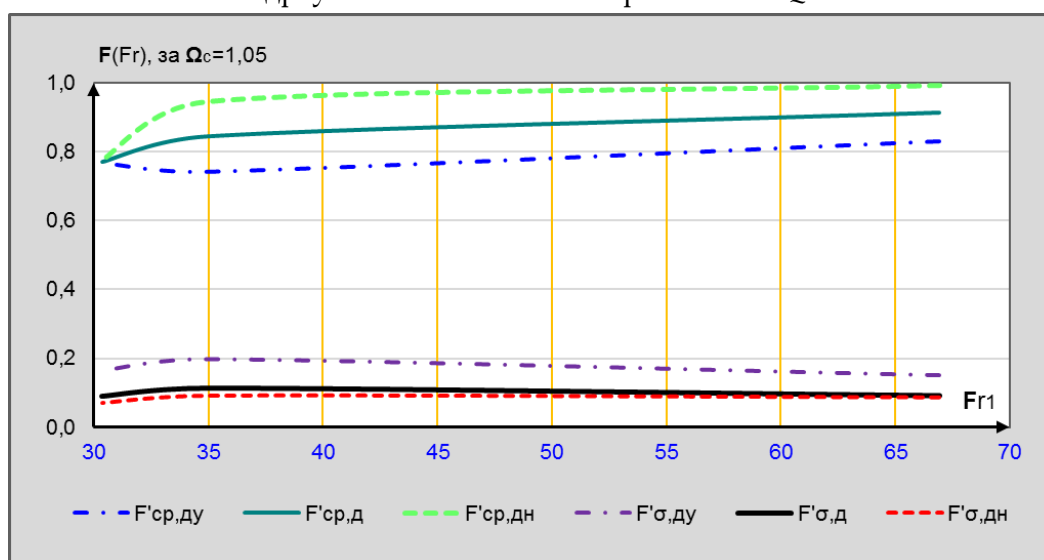
Слика 4.86 Пулзације на дну умирујућег базена на моделу ГФ-1V за приближно исту потопљеност скока $\Omega_I = 1$ и различите вредности Фрудовога броја у суженом пресеку

Са слике 4,87 се уочава да релативна сила од средњих притисака у умирујућем базену веома мало зависи од потопљености хидрауличког скока осим за $\Omega_I < 1,02$. Промена средњих притисака при промени

Фрудовога броја постоји само за $Fr_1 < 35$. Утицаји од пулзација такође се слабо мењају, како при промени потопљености, тако и при промени Фрудовога броја.

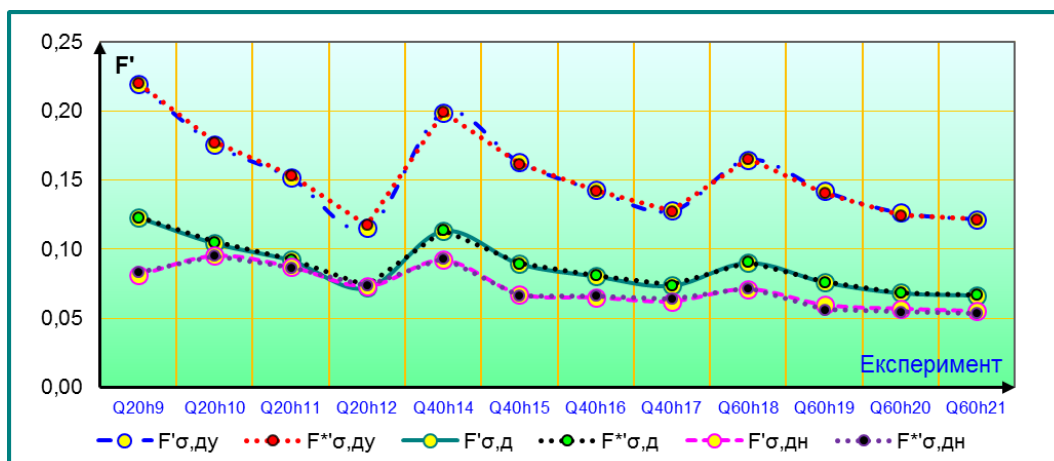


Слика 4.87 Промена утицаја у базену, при варијацији потопљености хидрауличног скока за експерименте 1VQ60



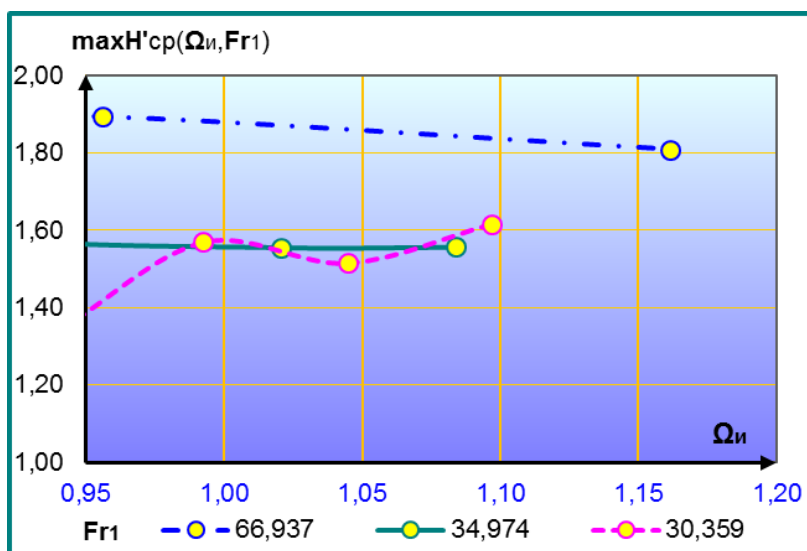
Слика 4.88 Промена утицаја у базену, при варијацији Фрудовога броја и истој потопљености хидрауличног скока у базену за модел ГФ-1V

Разлике добијених утицаја приликом прорачуна двема различитим методама, на моделу ГФ-1V (слика 4,89), су сличне као и на моделу ГФ-1М.

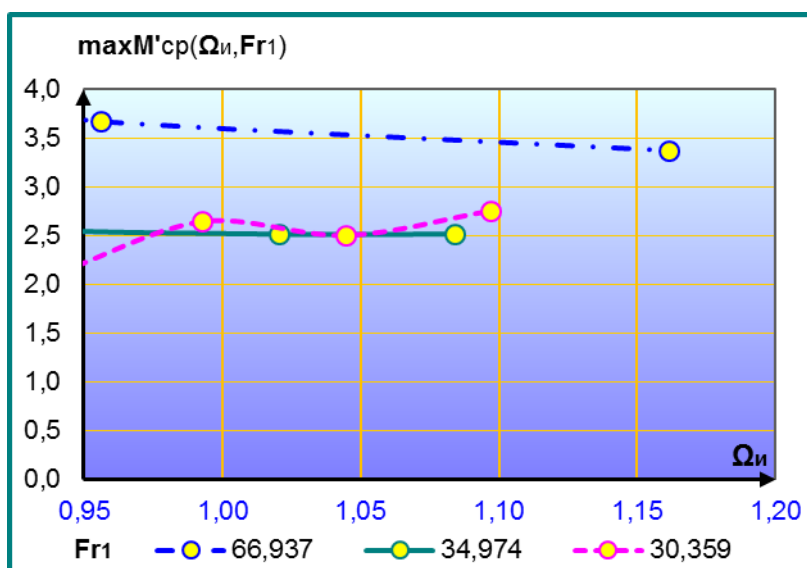


Слика 4.89 Слагање сила од пулзација (F') добијених различитим методама, прорачуна на моделу ГФ-1V

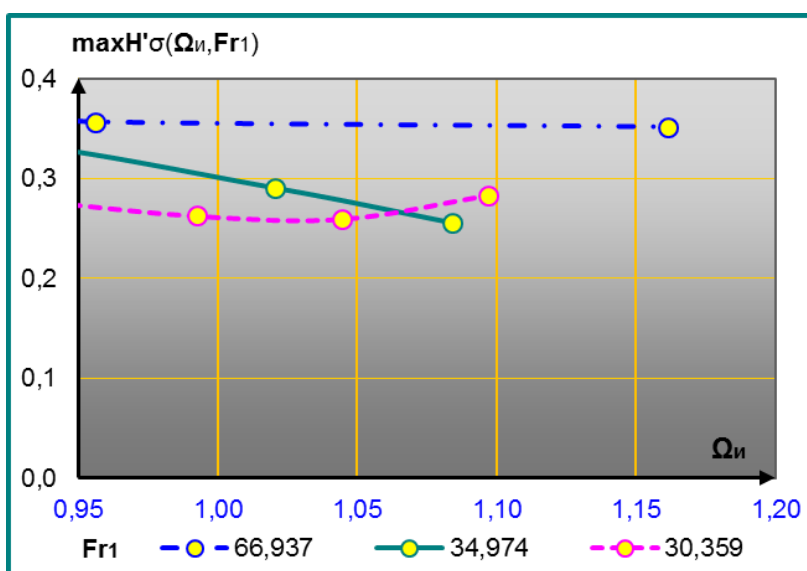
Оптерећење зида, као и меродавни утицаји у уклештењу су слични као и на моделу ГФ-1M, мада слике 4.90 - 4.93 могу да наведу и на другачије закључке. То је последица релативно „неодговарајућег“ избора дубине доње воде, односно потапања хидрауличког скока при протоку од $Q = 20 \text{ l/s}$ односно $Fr_1 = 66,94$. Како су остварена потапања током експеримената у пракси нереална, то су и одговарајући релативни утицаји нереални и неће бити коришћени за извођење закључака.



Слика 4.90 Промена максималне хоризонталне силе у уклештењу зида услед средњих притисака, у зависности од потопљености скока и Фрудовог броја на моделу ГФ-1V

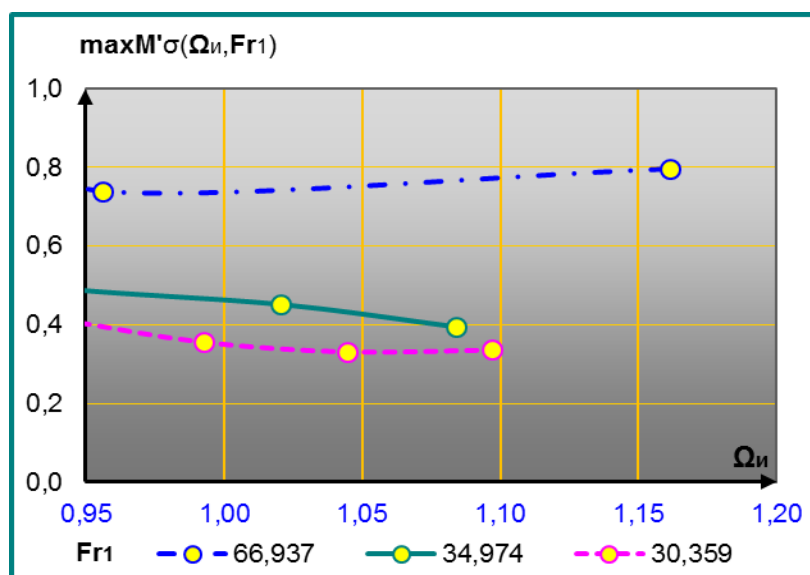


Слика 4.91 Промена максималног момента у уклештењу зида услед средњих притисака, зависно од потопљености скока и Фрудовог броја на моделу ГФ-1V



Слика 4.92 Промена максималне хоризонталне силе у уклештењу зида услед пулзација у зависности од потопљености скока и Фрудовог броја на моделу ГФ-1V

Чак и при веома широком пољу испитиваних (реалних и нереалних) потопљености хидрауличког скока, не може се уочити значајнија варијација утицаја од пулзација на зид умирујућег базена, што потврђује претпоставку да су пулзације углавном последица узводних услова (Фрудовог броја, односно протока), а да их дубина доње воде равномерно пригушује без обзира на потопљеност хидрауличког скока.

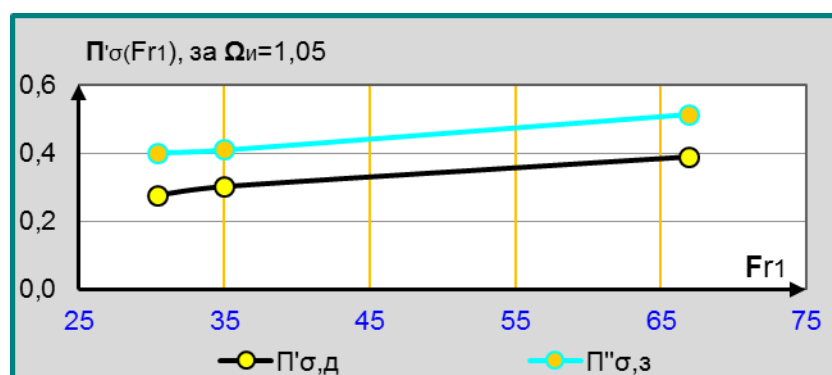


Слика 4.93 Промена максималног момента у уклештењу зида услед пулзација у зависности од потопљености скока и Фрудовог броја на моделу ГФ-1V

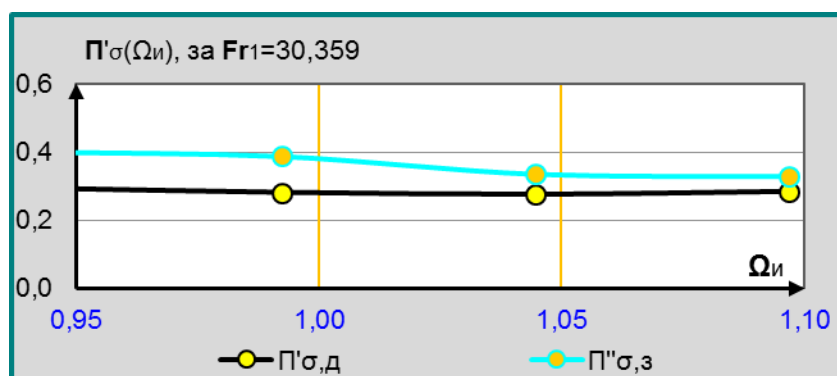
У табели 4.9 приказани коефицијенти пригушења пулзационе силе у дну умирујућег базена, током експеримената на моделу ГФ -1V.

Табела 4.9 Коефицијенти пригушења пулзационе силе на моделу ГФ-1V

$\Pi'\sigma$	$\Omega_{и}$	0,6762	0,9055	0,9559	1,1614
Fr1 =	66,937	0,3952	0,3867	0,3875	0,3851
$\Pi'\sigma$	$\Omega_{и}$	0,8973	0,9232	1,0206	1,0838
Fr1 =	34,974	0,3124	0,3063	0,3009	0,3017
$\Pi'\sigma$	$\Omega_{и}$	0,9402	0,9924	1,0447	1,0969
Fr1 =	30,359	0,2938	0,2810	0,2753	0,2837



Слика 4.94 Промена коефицијента пригушења пулзационе силе на моделу ГФ-1V у зависности од Фрудовог броја, при истој потопљености хидрауличног скока



Слика 4.95 Промена коефицијента пригушења пулзационе силе на моделу ГФ-1V у зависности од потопљености хидрауличког скока при истом Фрудовом броју

Парцијална анализа утицаја потопљености хидрауличког скока, $\Omega_{и}$, и Фрудовог броја Fr_1 на пригушење пулзационих сила (слике 4.94 и 4.95) не указује на постојање било каквих разлика у односу на модел ГФ-1M.

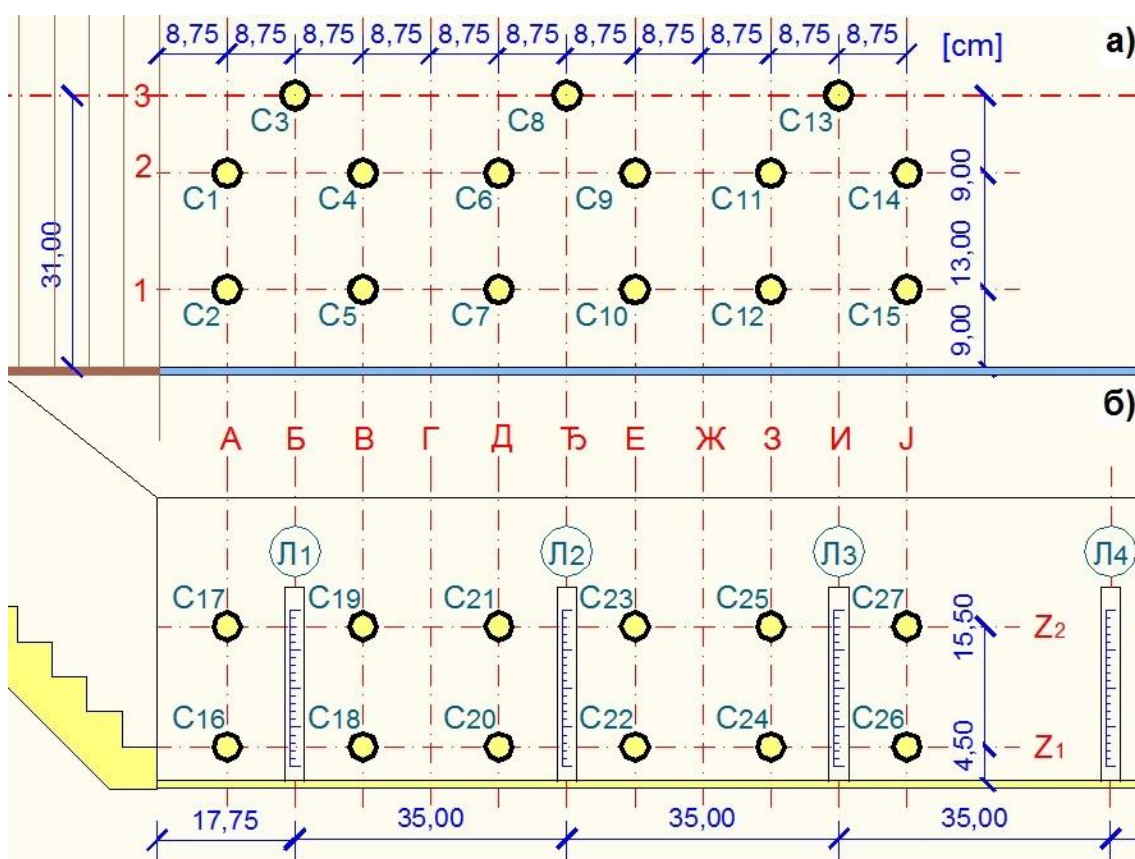
На моделу ГФ-0V нису регистроване доминантне учесталости утицаја на елементе конструкције при „реалним“ потопљеностима хидрауличког скока, док су за потопљеност скока од $\Omega_{и} = 0,94$ добијене доминантне учесталости од приближно 8 Hz, како на узводном делу дна, тако и на узводном делу зида умирујућег базена.

4.11 Резултати мерења на моделу ГФ-2M

Модел ГФ-2M означава умирујући базен иза непризматичног брзотока са мањим степеницима. Сужење брзотока је симетрично под углом од 10° . Преливна ивица на почетку брзотока је $B_{п} = 98$ cm, као и за све моделе, а ширина умирујућег базена је сужена на $B_{с} = 62$ cm (дакле сужење ширине на брзотоку је 36,75%). Прелаз из непризматичног брзотока у призматичан умирујући базен, ни на овом моделу није био хидраулички обликован. Узорковање је вршено са укупно 27 мерних сонди, од којих су 15 биле постављене у десној половини дна, а 12 на десном зиду базена.

Шема постављања мерних сонди на моделу ГФ-2M је приказана на слици 4.96.

У табели 4.10 приказани су најважнији резултати добијени обрадом измерених података.



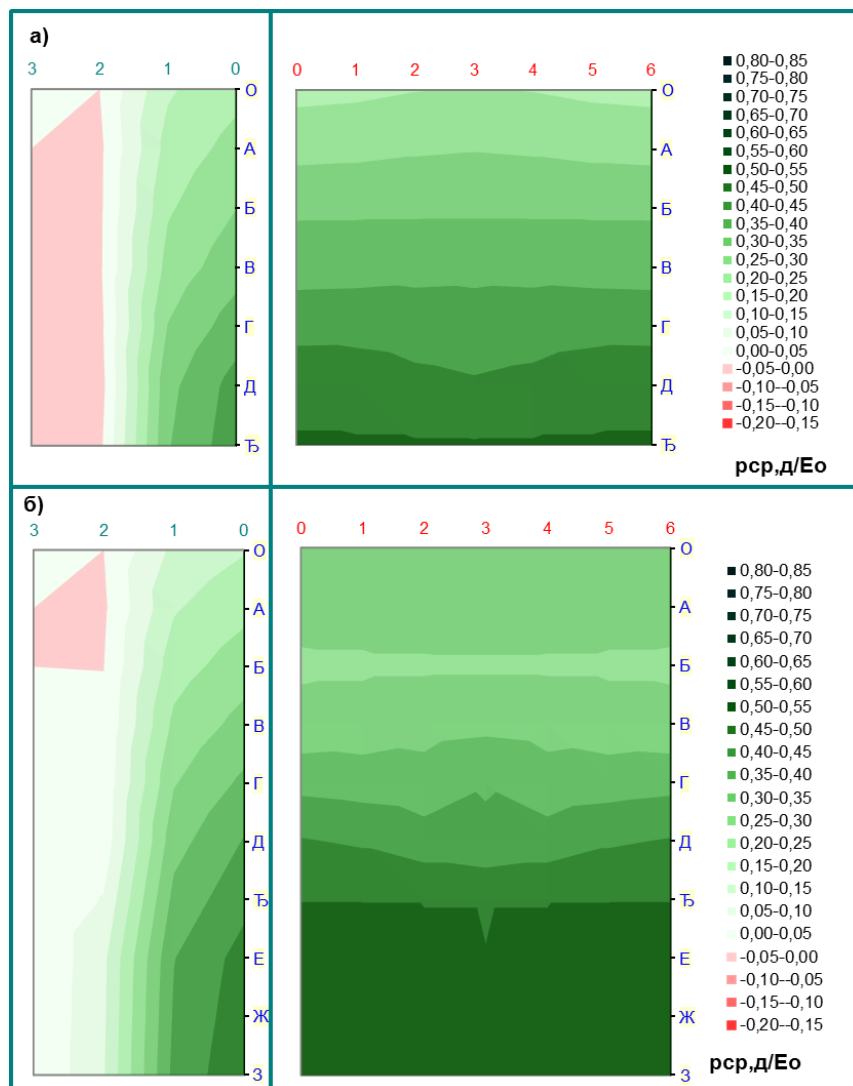
Слика 4.96 Распоред мерних сонди и лењира на моделу ГФ-2М

а) дно, б) зид

Табела 4.10 Резултати обраде мерних података на моделу ГФ-2М

Модел 2М-	Q20h11	Q20h12	Q20h13	Q20h14	Q40h17	Q40h18	Q40h19	Q40h20	Q60h21	Q60h22	Q60h23	Q60h24
Lc [cm]	60,00	60,00	60,00	60,00	85,00	85,00	85,00	85,00	105,00	105,00	105,00	105,00
Q [l/s]	20,00	20,00	20,00	20,00	40,00	40,00	40,00	40,00	60,00	60,00	60,00	60,00
h _{дв} [cm]	11,00	12,00	13,00	14,00	17,00	18,00	19,00	20,00	21,00	22,00	23,00	24,00
E ₀ [cm]	28,82	28,82	28,82	28,82	35,25	35,25	35,25	35,25	39,98	39,98	39,98	39,98
F _{Г1}	40,822	40,822	40,822	40,822	26,610	26,610	26,610	26,610	20,817	20,817	20,817	20,817
Ω _и	0,8147	0,9260	1,0020	1,0862	0,9261	1,0349	1,0917	1,1649	0,9686	1,0360	1,0776	1,1405
N	0,9101	0,9422	0,9440	0,9509	0,9324	0,9671	0,9624	0,9639	0,9512	0,9618	0,9645	0,9643
F _{ср,д}	0,5913	0,7165	0,7765	0,8162	0,6270	0,7307	0,7637	0,7841	0,5458	0,6986	0,7502	0,7527
F _{σ,д}	0,1437	0,1276	0,1107	0,0997	0,1059	0,0957	0,0871	0,0798	0,1049	0,0861	0,0775	0,0737
F [*] _{σ,д}	0,1432	0,1274	0,1107	0,0998	0,1056	0,0955	0,0870	0,0798	0,1052	0,0861	0,0775	0,0737
F _{ср,ду}	0,3360	0,5255	0,6224	0,6887	0,4066	0,5630	0,6185	0,6577	0,3097	0,5327	0,6135	0,6273
F _{σ,ду}	0,2337	0,2225	0,1919	0,1716	0,1922	0,1747	0,1540	0,1402	0,1754	0,1570	0,1378	0,1329
F [*] _{σ,ду}	0,2344	0,2199	0,1907	0,1701	0,1907	0,1747	0,1546	0,1404	0,1781	0,1555	0,1368	0,1311
F _{ср,дн}	0,8466	0,9074	0,9305	0,9438	0,8473	0,8984	0,9089	0,9105	0,7819	0,8645	0,8869	0,8780
F _{σ,дн}	0,1112	0,0896	0,0829	0,0783	0,0779	0,0672	0,0676	0,0647	0,0993	0,0729	0,0712	0,0671
F [*] _{σ,дн}	0,1104	0,0869	0,0817	0,0759	0,0754	0,0656	0,0687	0,0651	0,1036	0,0694	0,0693	0,0636
maxH [*] _{ср,з}	1,4081	1,4806	1,3719	1,4189	1,2073	1,3052	1,3088	1,3402	1,4099	1,4387	1,4736	1,4725
maxM [*] _{ср,з}	2,5797	2,5296	2,1856	2,2237	1,7459	1,9496	1,9573	2,0271	2,0935	2,1557	2,2204	2,2215
maxH [*] _{σ,з}	0,2687	0,2873	0,2475	0,2259	0,2588	0,3217	0,2910	0,2504	0,2538	0,3009	0,2788	0,2554
maxM [*] _{σ,з}	0,5148	0,5257	0,4060	0,5831	0,4737	0,5640	0,4381	0,3427	0,3466	0,3735	0,3335	0,3083

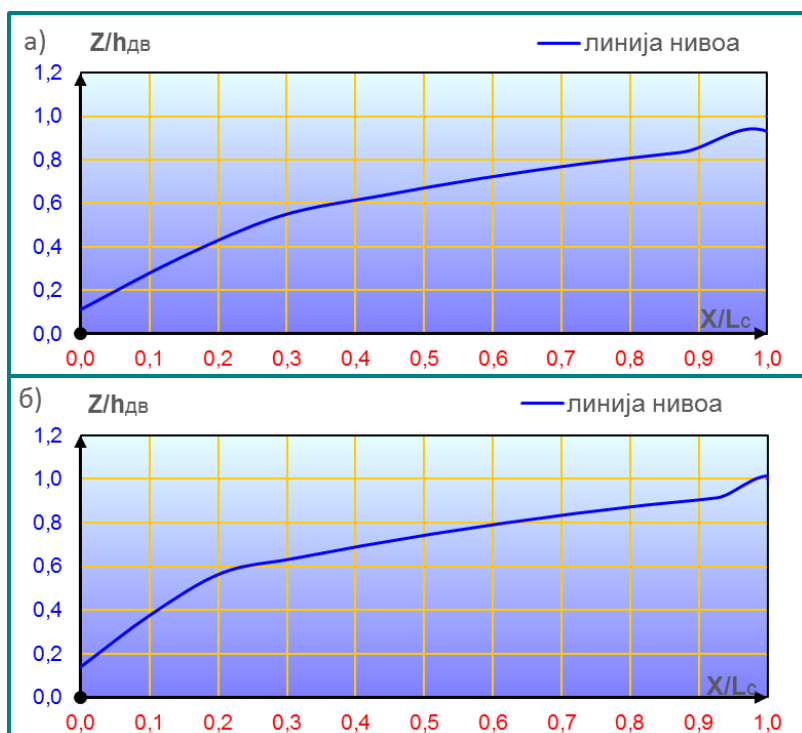
Резултати добијени на овом моделу, су генерално слични одговарајућим на моделу ГФ-1М, само су специфичности, које су биле приписане сужењу брзотока, сада израженије.



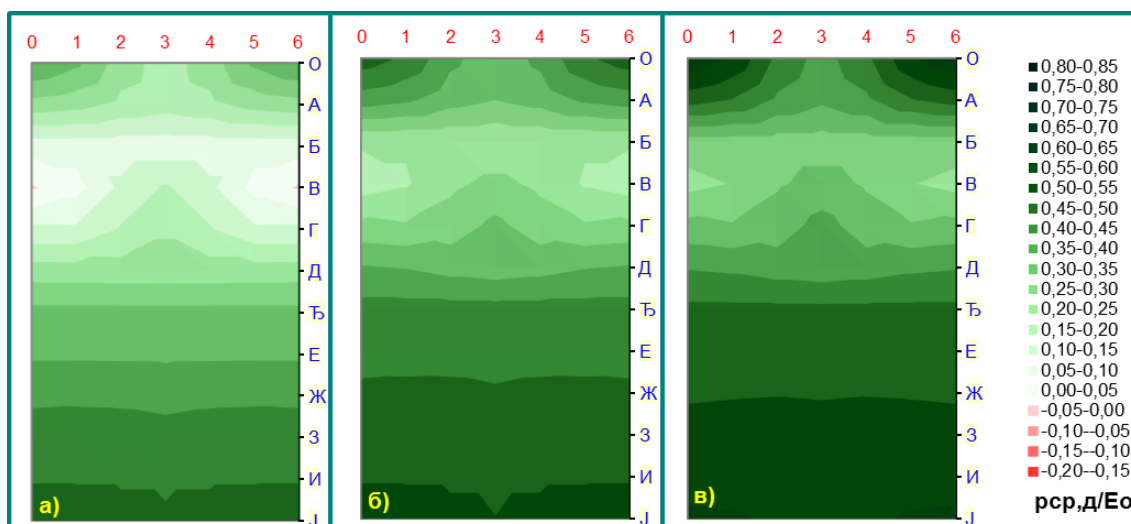
Слика 4.97 Средњи притисци у дну базена за експерименте
а) 2MQ20h12 и б) 2MQ40h18

Слапиште је на овом моделу уско, па је и равномерна расподела средњих притисака у попречним пресецима (слика 4.97) потпуно очекивана. За веће вредности Фрудовога броја средњи притисци су и даље равномерно распоређени дуж умирујућег базена. Сужени пресек је на самом почетку базена, а линија нивоа (слика 4.98) равномерно се пење до коте доње воде. Пресек у коме линија нивоа досеже ниво доње воде се

помера све узводније са повећањем потопљености, што је и очекивана слика хидрауличког скока дуж целог умирујућег базена.

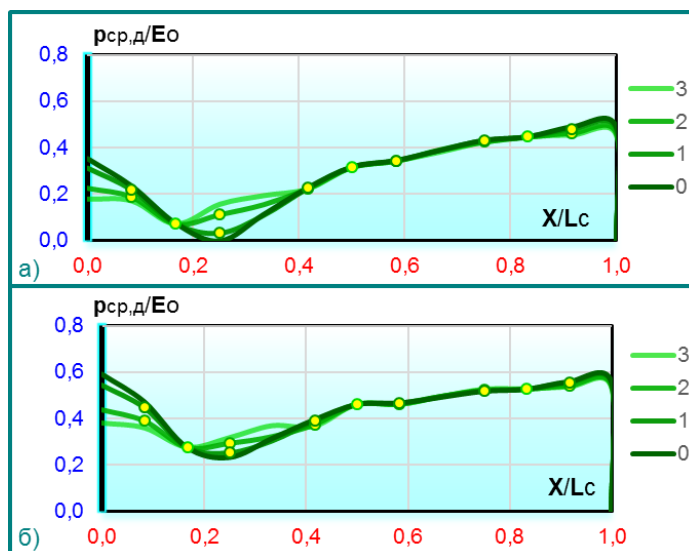


Слика 4.98 Линија нивоа за експерименте
а) 2MQ20h12 и б) 2MQ40h18



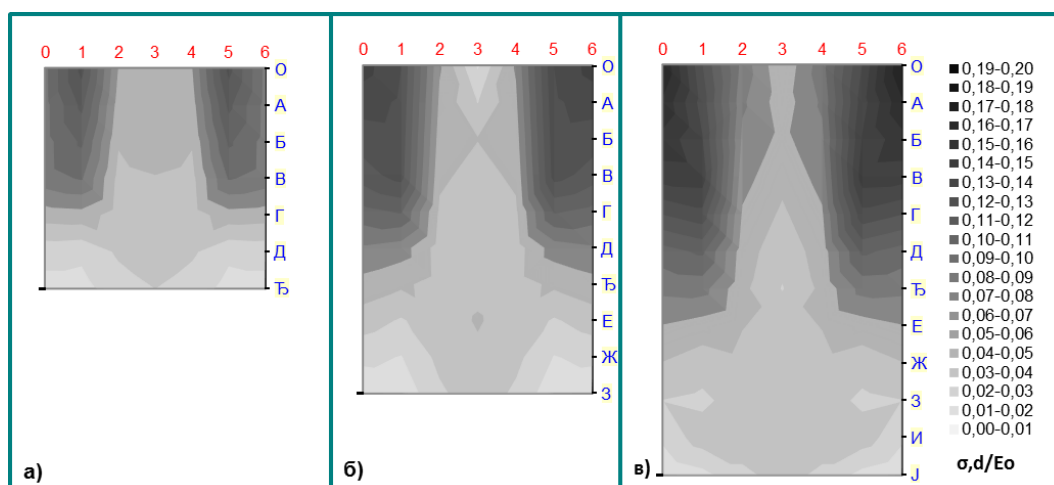
Слика 4.99 Средњи притисци на дно при $Fr_1 = 20,82$ и различитим
потопљеностима хидрауличког скока:
а) $\Omega_{и} = 0,97$ б) $\Omega_{и} = 1,04$ в) $\Omega_{и} = 1,08$

При већем протоку, односно при нижим вредностима Фрудовог броја, сужени пресек улази унутар базена и заузима положај који, као и на моделима ГФ-1М и ГФ1V, уопште не зависи од низводног услова, односно од дубине потапања хидрауличког скока (слика 4.100).



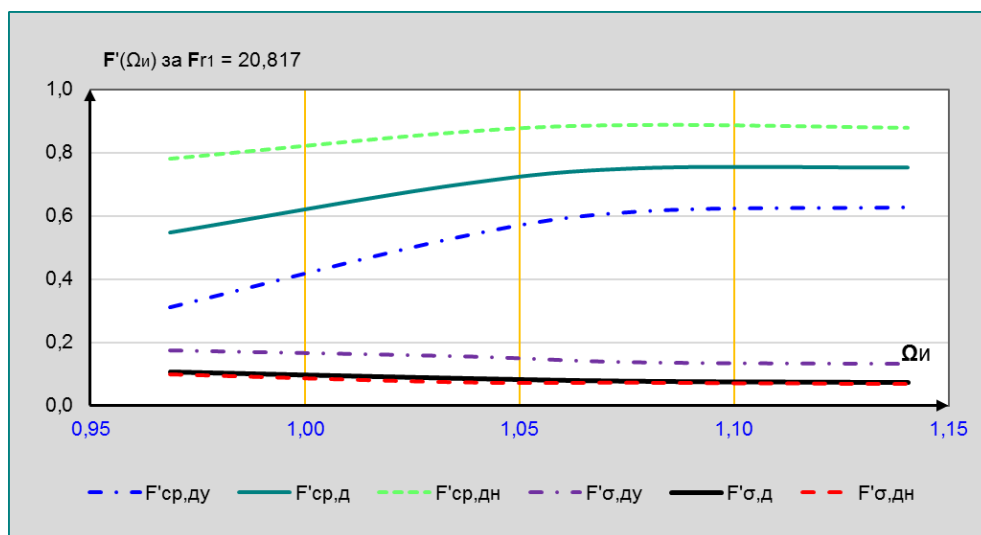
Слика 4.100 Расподела средњих притисака на дно при $Fr_1 = 20,82$ и различитим потоњеностима хидрауличког скока: а) $\Omega_I = 1,04$ б) $\Omega_I = 1,08$

На слици 4.100 може се приметити да при варирању потоњености хидрауличког скока, подужна расподела притисака дуж базена практично не мења своју „линију кривине“, већ само дуж целог базена подједнако повећава свој интензитет.

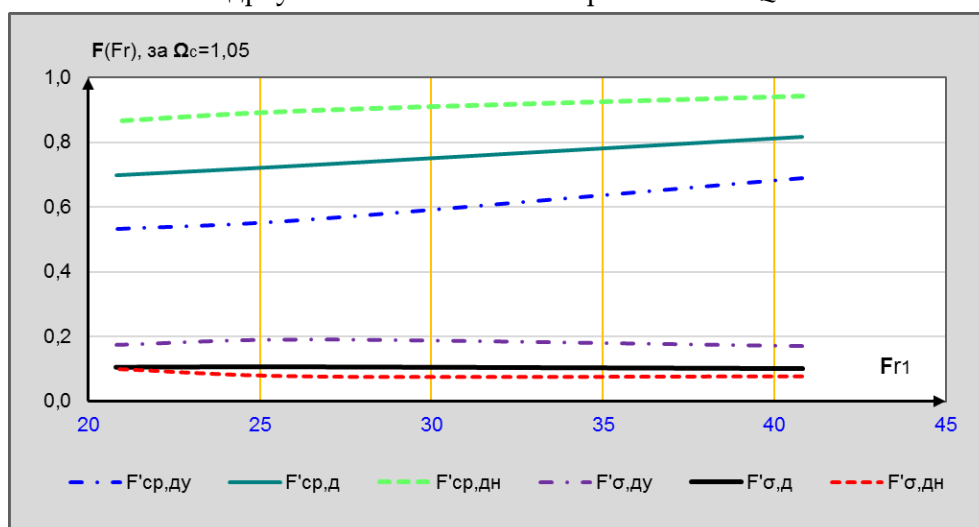


Слика 4.101 Расподела пулзација на дно базена при једнаким потоњеностима хидрауличког скока и различитим Фрудовим бројевима у суженом пресеку а) $Fr_1 = 40,82$ б) $Fr_1 = 26,61$ и в) $Fr_1 = 20,82$

Са дијаграма утицаја унутар базена, при константном протоку $Q = 60 \text{ l/s}$ (слика 4.36), односно Фрудовом броју $Fr_1 = 20,817$, може се приметити да са потоњеношћу скока, на овом моделу, значајно утиче на средње притиске, када је $\Omega_{и} < 1,05$. За веће вредности потоњености хидрауличног скока релативни утицаји од средњих притисака конвергирају. Слично важи и за пулзације, с тим што овде за мање потоњености скока релативни утицаји расту.



Слика 4.102 Промена утицаја у базену, при варијацији потоњености хидрауличног скока за експерименте 2MQ60

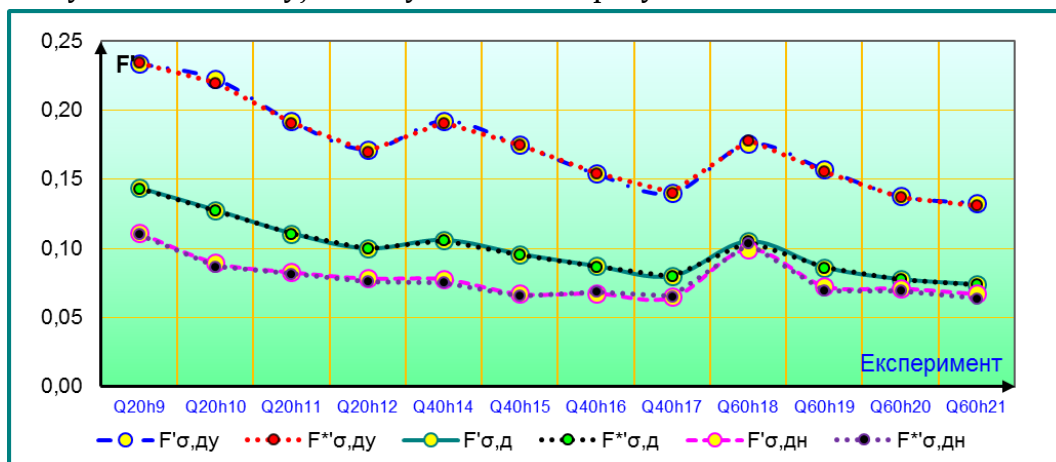


Слика 4.103 Промена утицаја у базену, при варијацији Фрудовог броја при истој потоњености хидрауличног скока у базену на моделу ГФ-2М

Када се посматрају најважнији утицаји на конструктивне елементе умирујућег базена, при једнаким потоњеностима хидрауличног скока, и

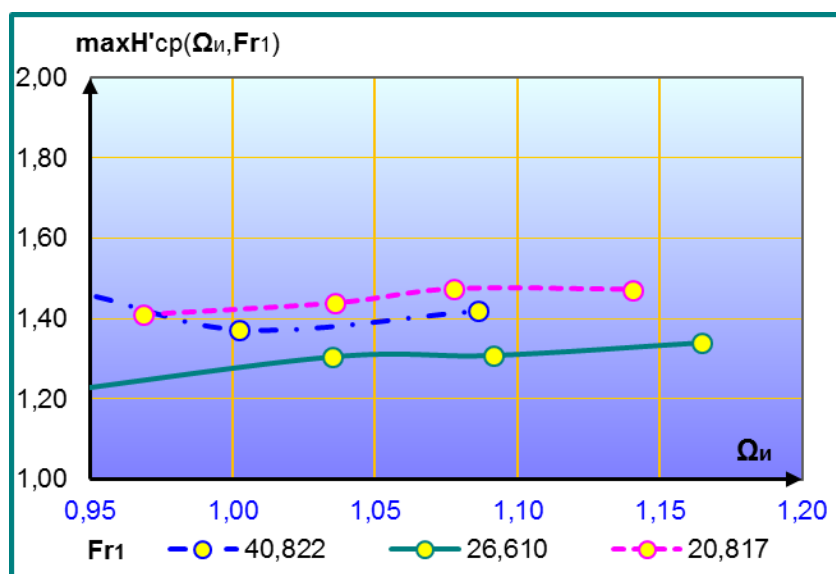
различитим вредностима Фрудовог броја (слика 4.103) уочавамо да нема разлике у односу на моделе ГФ-1М и ГФ-0М.

Поређење утицаја добијених различитим методама прорачуна на моделу ГФ-2М показује потпуно слагање резултата.



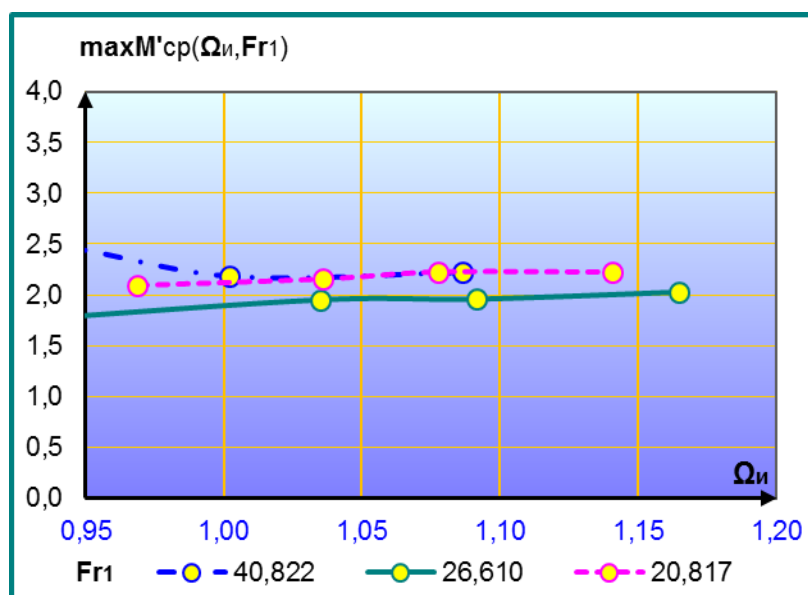
Слика 4.104 Слагање сила од пулзација (F') добијених директном методом, са силама (F^*) добијеним под претпоставком о нормалној расподели на моделу ГФ-2М

Оптерећење на зид умирујућег базена се на овом моделу не разликује битно од модела ГФ-1М.

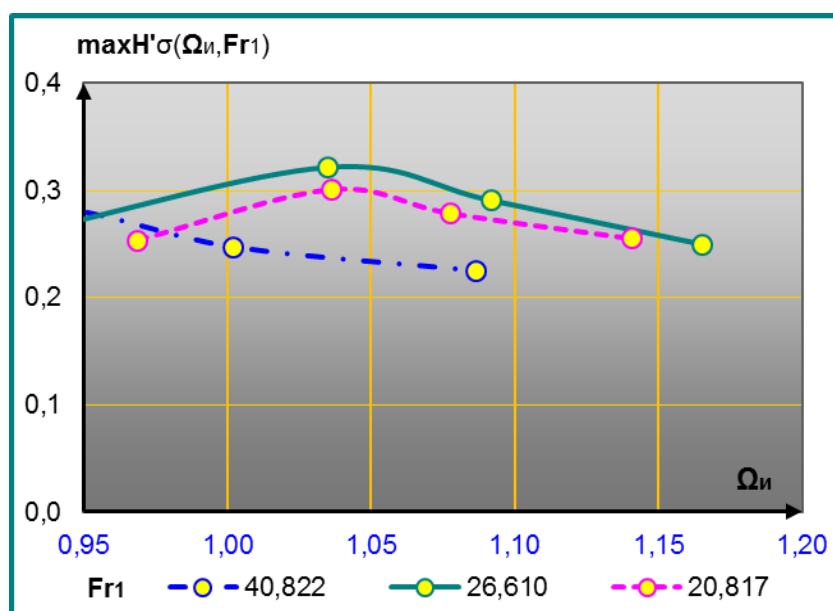


Слика 4.105 Промена максималне хоризонталне силе у уклештењу зида услед средњих притисака, у зависности од потопљености скока и Фрудовог броја на моделу ГФ-2М

Са слика 4.105 и 4.106, може се закључити да максимални утицаји у уклештењу зида слабо варирају при промени потоцљености хидрауличког скока и крећу се испод вредности од 1,5 за хоризонталне силе, и 2,5 за одговарајуће моменте.

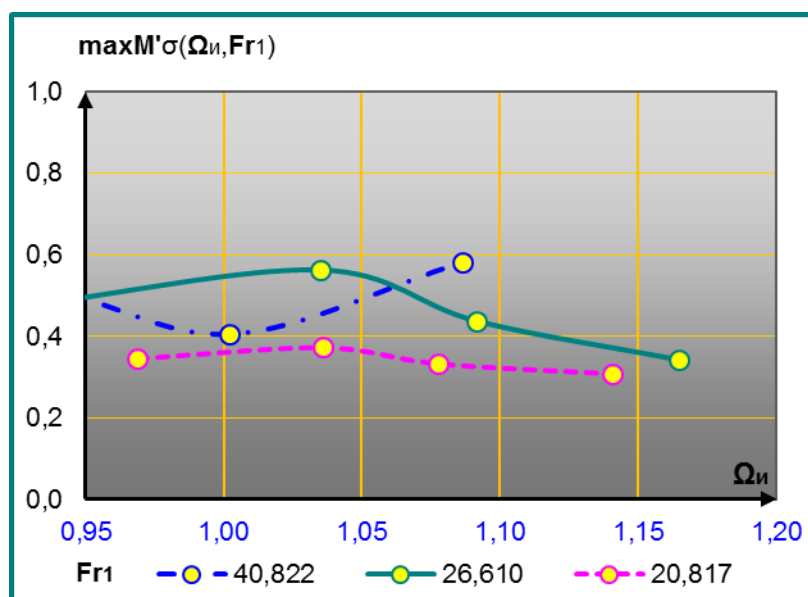


Слика 4.106 Промена максималног момента у уклештењу зида услед средњих притисака, зависно од потоцљености скока и Фрудовог броја на моделу ГФ-2М



Слика 4.107 Промена максималне хоризонталне силе у уклештењу зида услед пулзација у зависности од потоцљености скока и Фрудовог броја на моделу ГФ-2М

Максимални утицаји од пулзација (слике 4.107 и 4.108) нешто више варирају приликом промене потоцљености хидрауличког скока, при чему су максималне вредности 0,35 за хоризонталне силе, и 0,6 за одговарајуће моменте у уклештењу.



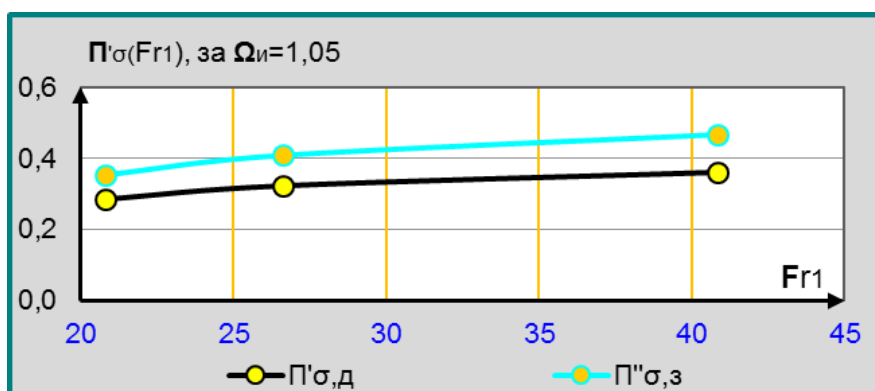
Слика 4.108 Промена максималног момента у уклештењу зида услед пулзација у зависности од потоцљености скока и Фрудовог броја на моделу ГФ-2М

У табели 4.11 приказани су коефицијенти пригушења у дну умирујућег базена, током експеримената на моделу ГФ-2М.

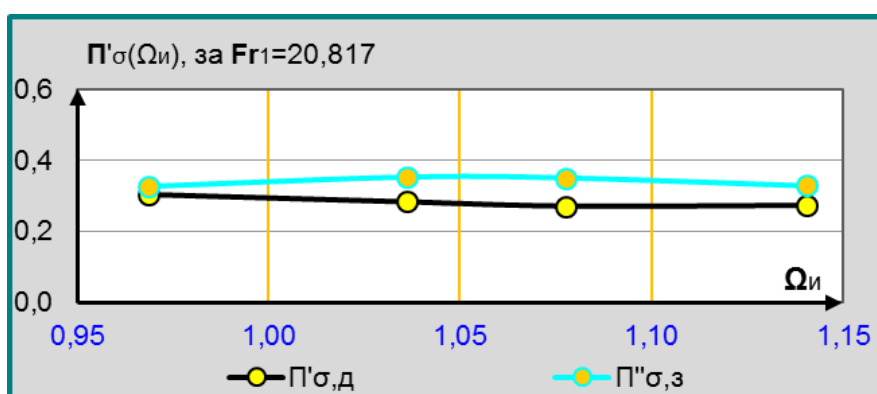
Табела 4.11 Коефицијенти пригушења пулзационе силе на моделу ГФ-2М

$\Pi'\sigma$	Ω_i	0,8147	0,9260	1,0020	1,0862
$Fr_1 =$	40,822	0,3801	0,3771	0,3683	0,3599
$\Pi'\sigma$	Ω_i	0,9261	1,0349	1,0917	1,1649
$Fr_1 =$	26,610	0,3206	0,3218	0,3225	0,3205
$\Pi'\sigma$	Ω_i	0,9686	1,0360	1,0776	1,1405
$Fr_1 =$	20,817	0,3048	0,2838	0,2717	0,2737

Ако се изврши парцијална анализа утицаја потоцљености хидрауличког скока, Ω_i , и Фрудовог броја Fr_1 на пригушење пулзационих сила (слике 4.109 и 4.110) може се закључити да и на овом моделу, као и на моделу ГФ-1М, превлађује узводни утицај, али је то сада подједнако изражено на зиду и у дну.

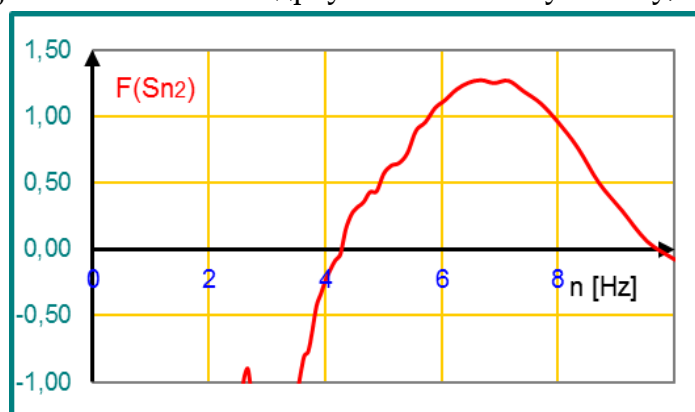


Слика 4.109 Промена коефицијента пригушења пулзационе силе на моделу ГФ-2V у зависности од Фрудовога броја, при истој потопљености хидрауличког скока



Слика 4.110 Промена коефицијента пригушења пулзационе силе на моделу ГФ-2V у зависности од потопљености хидрауличког скока при истом Фрудовом броју

На моделу ГФ-1М су забележене доминантне фреквенце које могу изазвати повећање утицаја само на узводној плочи базена и то при нереално ниској потопљености хидрауличког скока у базену, $\Omega_{и} = 0,926$.



Слика 4.111 Доминантне фреквенце утицаја на узводни део плоче базена у експерименту: 2MQ40h17 ($\Omega_{и} = 0,926$)

4.12 Резултати мерења на моделу ГФ-2V

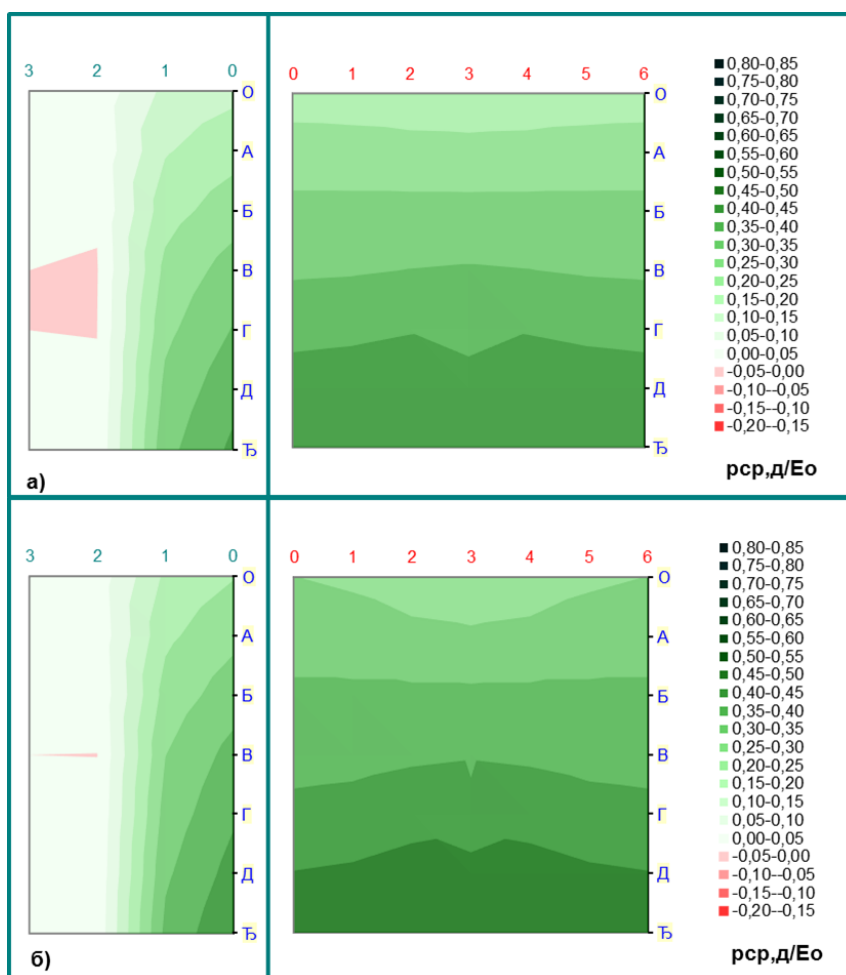
Умирујући базен модел ГФ-2V је потпуно идентичан моделу ГФ-2M (док су степеници на брзотоку двоструко већи). Шема постављања мерних сонди и коришћена мерна опрема су исти као и за модел ГФ-2M (слика 4.96). Добијени резултати приказани су у табели 4.12.

Табела 4.12 Резултати обраде мерних података на моделу ГФ-2V

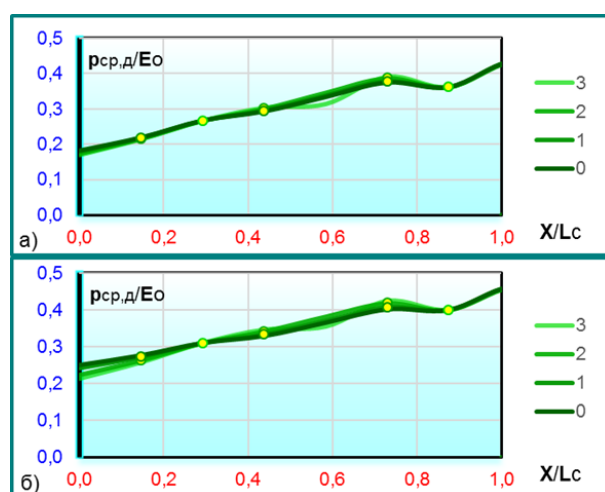
Модел 2V-	Q20h10	Q20h11	Q20h12	Q20h13	Q40h16	Q40h17	Q40h18	Q40h19	Q60h21	Q60h22	Q60h23	Q60h24
Lc [cm]	60,00	60,00	60,00	60,00	85,00	85,00	85,00	85,00	110,00	110,00	110,00	110,00
Q [l/s]	20,00	20,00	20,00	20,00	40,00	40,00	40,00	40,00	60,00	60,00	60,00	60,00
hдв [cm]	10,00	11,00	12,00	13,00	16,00	17,00	18,00	19,00	21,00	22,00	23,00	24,00
Eo [cm]	30,09	30,09	30,09	30,09	35,93	35,93	35,93	35,93	40,95	40,95	40,95	40,95
Fr1	43,754	43,754	43,754	43,754	27,479	27,479	27,479	27,479	21,692	21,692	21,692	21,692
Ωи	0,6579	0,8761	0,9083	1,0369	0,7831	0,9396	1,0210	1,0802	0,9713	1,0010	1,0779	1,0542
N	0,5690	0,9335	0,9499	0,9542	0,8786	0,9443	0,9610	0,9677	0,9607	0,9609	0,9675	0,9662
F'ср,д	0,2351	0,7223	0,7796	0,8112	0,2461	0,6650	0,8039	0,8240	0,7531	0,7913	0,8384	0,8415
F'σ,д	0,2142	0,1301	0,1175	0,1044	0,1263	0,1011	0,0866	0,0785	0,0803	0,0754	0,0692	0,0658
F*σ,д	0,2425	0,1293	0,1169	0,1047	0,1345	0,1007	0,0861	0,0780	0,0804	0,0754	0,0692	0,0658
F'ср,ду	0,0848	0,5381	0,6359	0,6925	0,1401	0,4825	0,6757	0,7130	0,6100	0,6760	0,7456	0,7596
F'σ,ду	0,1749	0,2308	0,2057	0,1813	0,1313	0,1794	0,1537	0,1404	0,1489	0,1359	0,1232	0,1138
F*σ,ду	0,1908	0,2257	0,2025	0,1808	0,1323	0,1773	0,1520	0,1378	0,1460	0,1344	0,1216	0,1133
F'ср,дн	0,3854	0,9065	0,9233	0,9300	0,3522	0,8474	0,9320	0,9350	0,8962	0,9066	0,9312	0,9234
F'σ,дн	0,3590	0,0955	0,0878	0,0797	0,2065	0,0842	0,0724	0,0683	0,0716	0,0695	0,0670	0,0664
F*σ,дн	0,4274	0,0908	0,0855	0,0787	0,2260	0,0799	0,0684	0,0631	0,0636	0,0654	0,0638	0,0645
maxH'ср,з	1,2564	1,8164	1,7187	1,6166	0,9550	1,4498	1,5437	1,4986	1,7288	1,7040	1,6766	1,6502
maxM'ср,з	2,8584	3,5748	3,1067	2,7303	2,5726	2,2384	2,4544	2,3467	2,8240	2,7633	2,6884	2,6278
maxH'σ,з	0,3091	0,3784	0,3408	0,2992	0,2865	0,2936	0,2691	0,2452	0,2610	0,2591	0,2481	0,2336
maxM'σ,з	0,7458	0,8556	0,7013	0,6455	0,5761	0,4907	0,4058	0,3357	0,3455	0,3385	0,3158	0,2972

Резултати добијени на моделу ГФ-2V су веома слични са одговарајућим на моделу ГФ-2M. Средњи притисци, за веће вредности Фрудовог броја ($Fr_1 > 40$), равномерно расту дуж умирујућег базена и прате линију нивоа са суженим пресеком на самом почетку и низводним граничним условом на крају (слика 4.112). Варијација потоњености хидрауличког скока не доводи до промене подужне расподеле средњих притисака, већ изазива њихову уједначену промену (слика 4.113). Слично понашање средњих притисака је забележено и на моделу ГФ-2M, али на нешто ширем подручју Фрудових бројева, $Fr_1 > 25$.

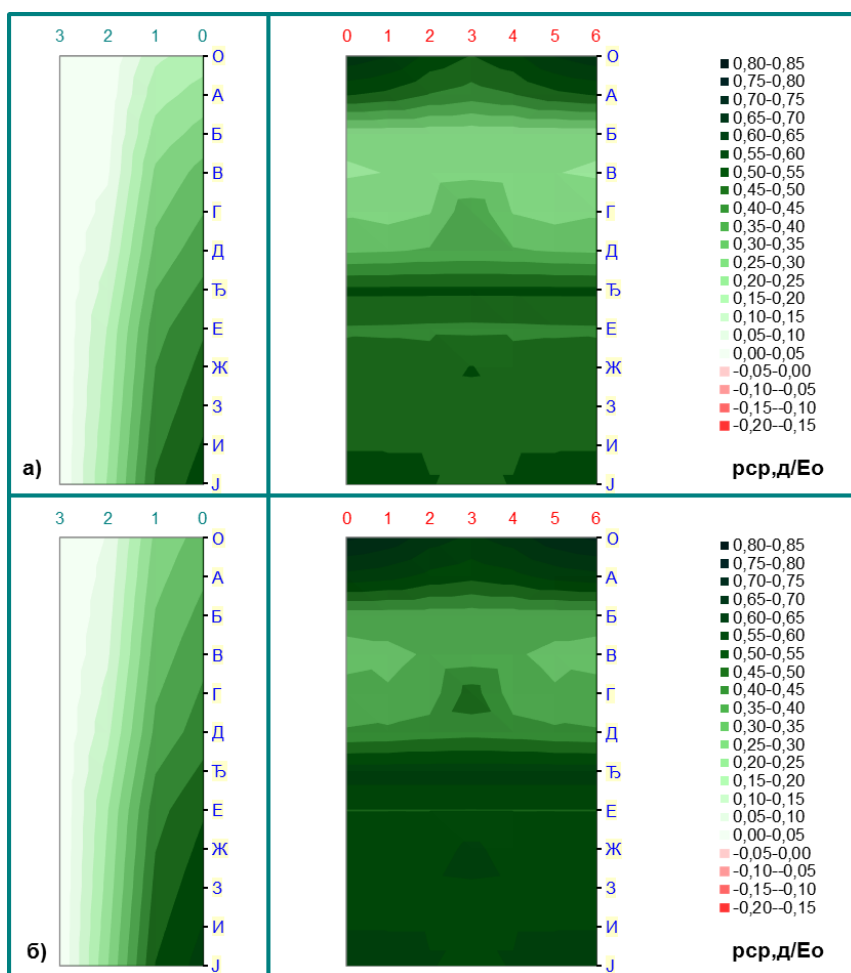
При мањим вредностима Фрудовог броја $Fr_1 < 35$, сужени пресек улази у умирујући базен и стабилизује се на $X' = 0,25 \div 0,30$. Варијације потоњености хидрауличког скока у базену не утичу на положај суженог пресека, а не мењају ни прерасподелу притиска дуж базена, већ само његове ординате (слика 114).



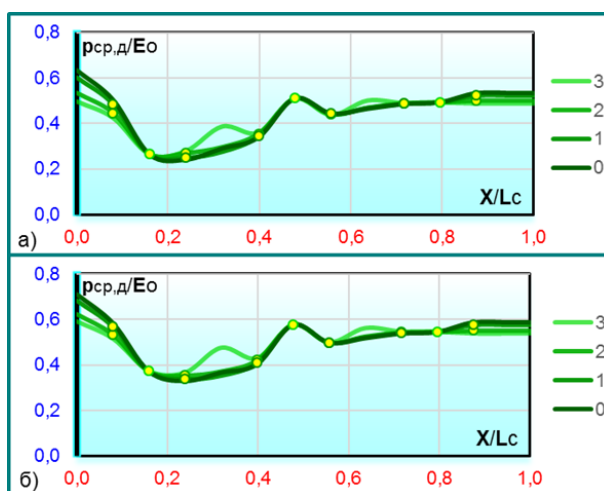
Слика 4.112 Средњи притисци у дну умирујућег базена за експерименте а) 2VQ20h12 и б) 2VQ20h13



Слика 4.113 Средњи притисци у подужним пресецима базена за експерименте а) 2VQ20h12 и б) 2VQ20h13

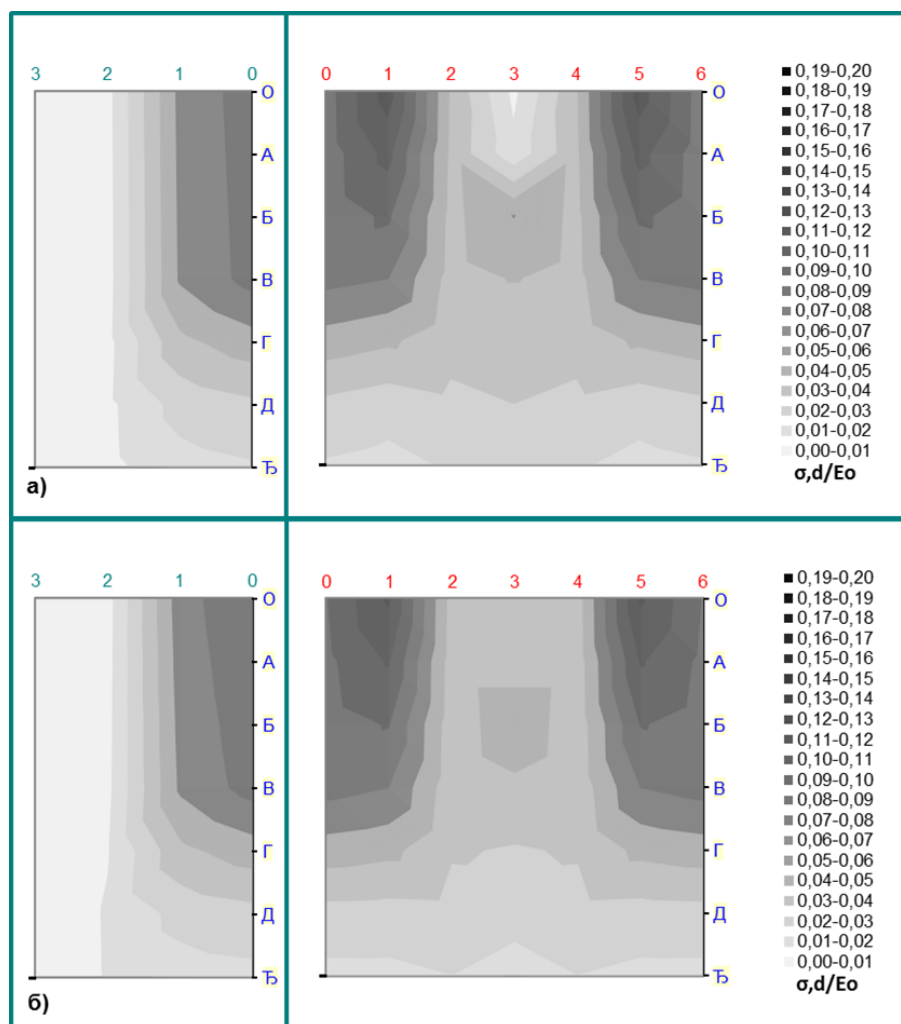


Слика 4.114 Средњи притисци у дну умирујућег базена за експерименте а) 2VQ60h22 и б) 2VQ60h24



Слика 4.115 Средњи притисци у подужним пресецима базена за експерименте а) 2VQ60h22 и б) 2VQ60h24

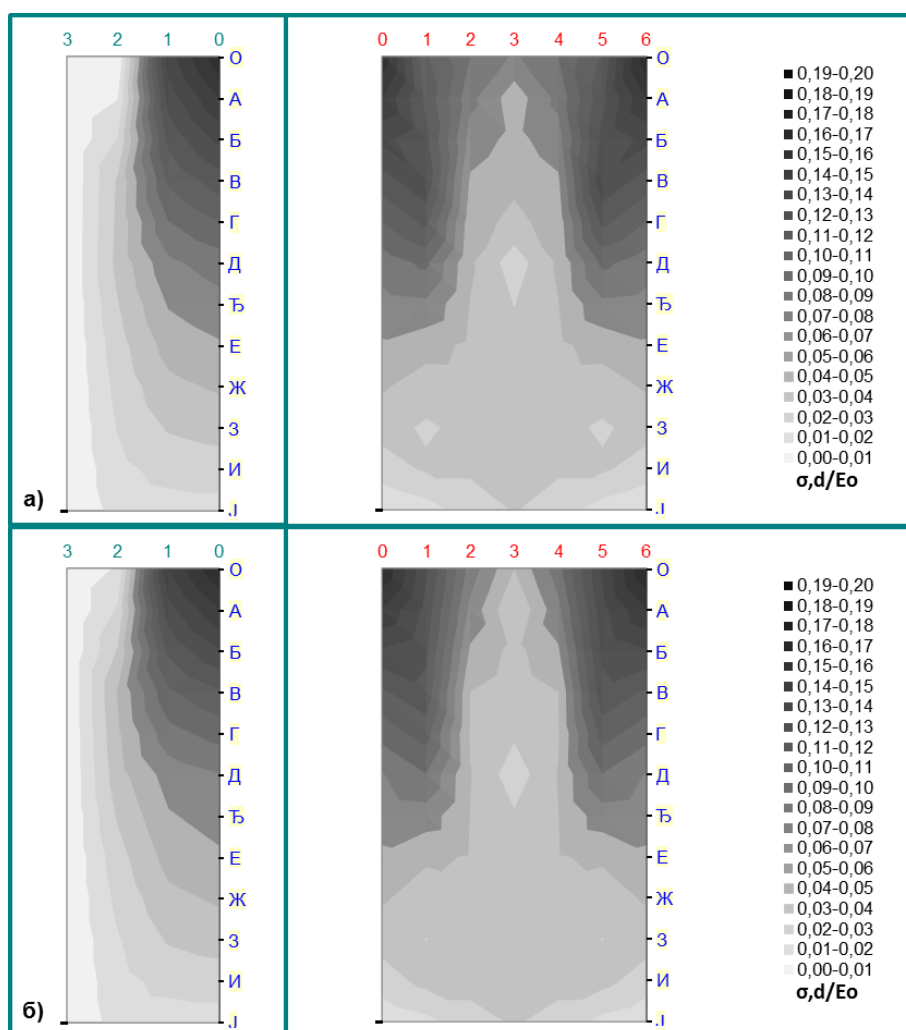
Ако се посматра стање средњих притисака у подужним пресецима, може се уочити да се са променом потопљености хидрауличног скока, крива расподеле подиже и спушта, не мењајући свој облик (слика 115). Овде се може уочити и главна особеност овог модела, а то је појава локалног увећања средњих притисака у попречном пресеку на средини слапишта. Обављене анализе нису пружиле одговор о томе шта изазива ово повећање, осим да је оно присутно када важи $Fr_1 < 35$.



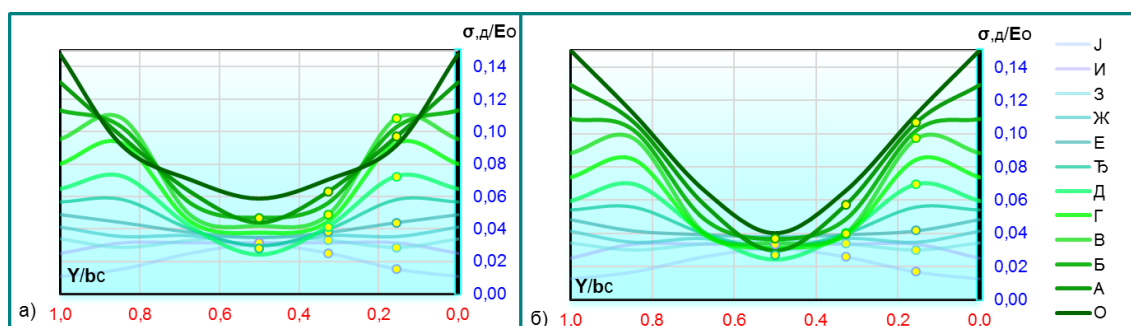
Слика 4.116 Пулзације у дну умирујућег базена за експерименте
а) 2VQ20h12 и б) 2VQ20h13

Прерасподела пулзација у попречном пресеку се региструје на моделу ГФ-2V, за све вредности Фрудовог броја (слика 4.116). При нижим вредностима Фрудовог броја ($Fr_1 < 35$), ова појава се појачава. Промена потопљености хидрауличног скока може само незнатно да утиче на

пулзације и то једино на крају базена, где већа дубина може да пригуши њихову, на том месту, већ веома ниску вредност (слике 4.117 и 4.118).

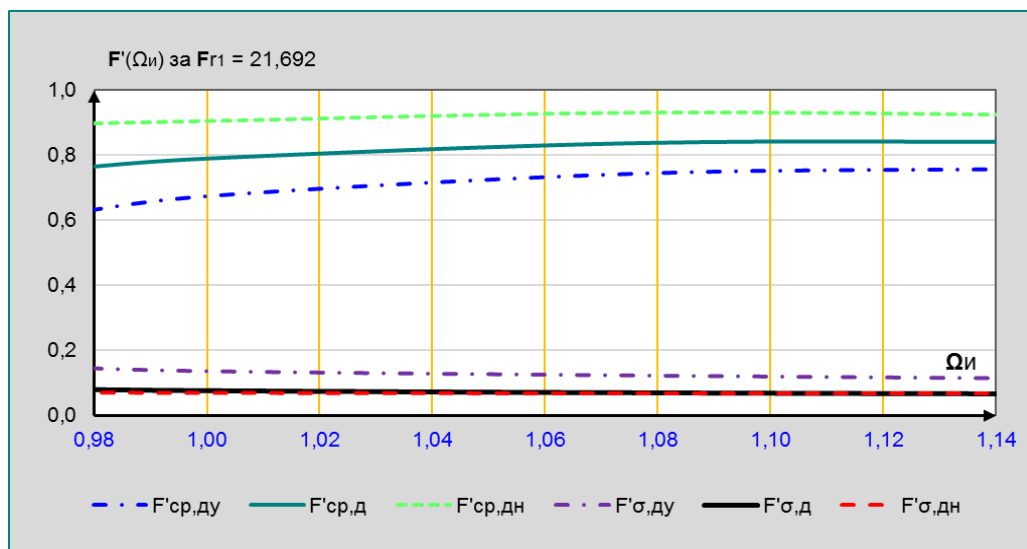


Слика 4.117 Пулзације у дну умирујућег базена за експерименте
а) 2VQ60h22 и б) 2VQ60h24

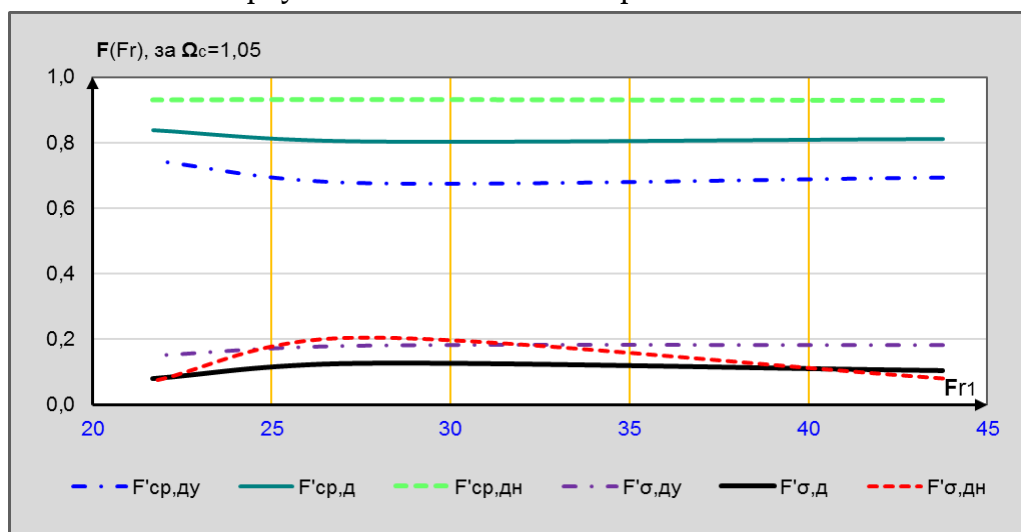


Слика 4.118 Расподела пулзација у попречним пресецима умирујућег базена за
експерименте а) 2VQ60h22 и б) 2VQ60h24

Граничном анализом на дијаграму најважнијих утицаја на дну базена, при константном протоку $Q = 60 \text{ l/s}$ (слика 4.56), односно Фрудовом броју $Fr_1 = 21,692$, може се приметити да са порастом потоњености скока, средњи притисци незнатно расту, а пулзације готово неприметно опадају (слика 4.119).



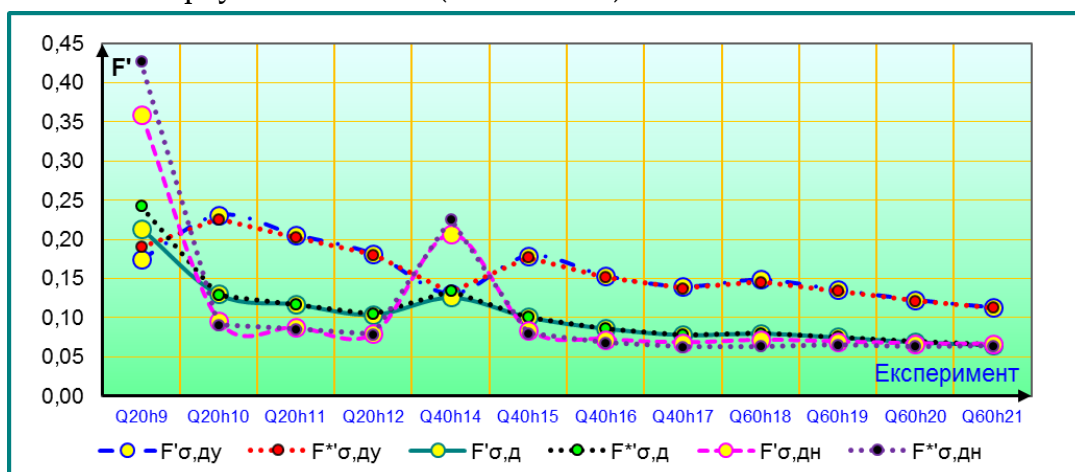
Слика 4.119 Промена утицаја у базену, при варијацији потоњености хидрауличког скока за експерименте 2VQ60



Слика 4.120 Промена утицаја у базену, при варијацији Фрудовог броја и истој потоњености хидрауличког скока у базену на моделу ГФ-2V

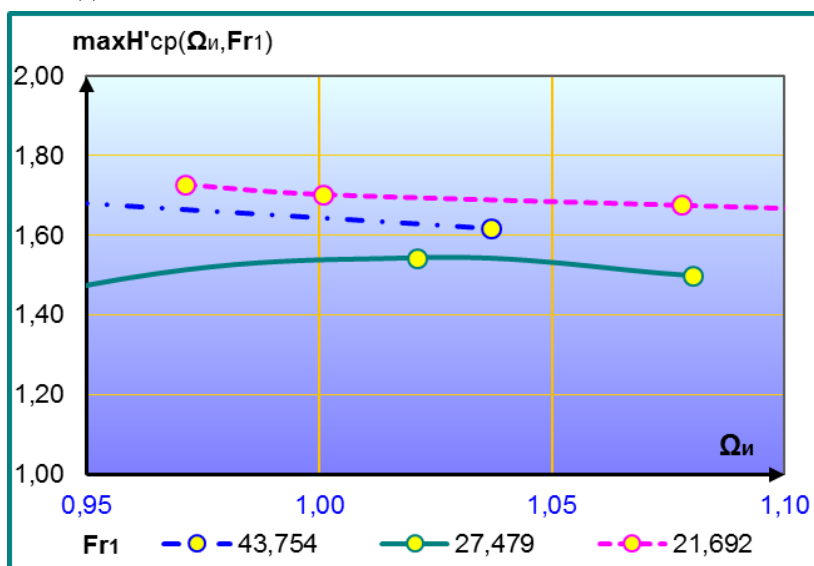
Ако се посматрају промене главних утицаја на дно, за различите Фрудове бројеве, при константним потоњеностима хидрауличког скока,

може се уочити да промене главних постоје само за $Fr_1 < 30$, осим у случају силе од пулзација на низводном делу базена, која наставља да равномерно опада са порастом Фрудовог броја (слика 4.120). На моделу ГФ-2V разлике добијених утицаја приликом прорачуна двама различитим методама су уочљиве, али само у зони нереално ниских коефицијената потапања хидрауличког скока (слика 4,121).

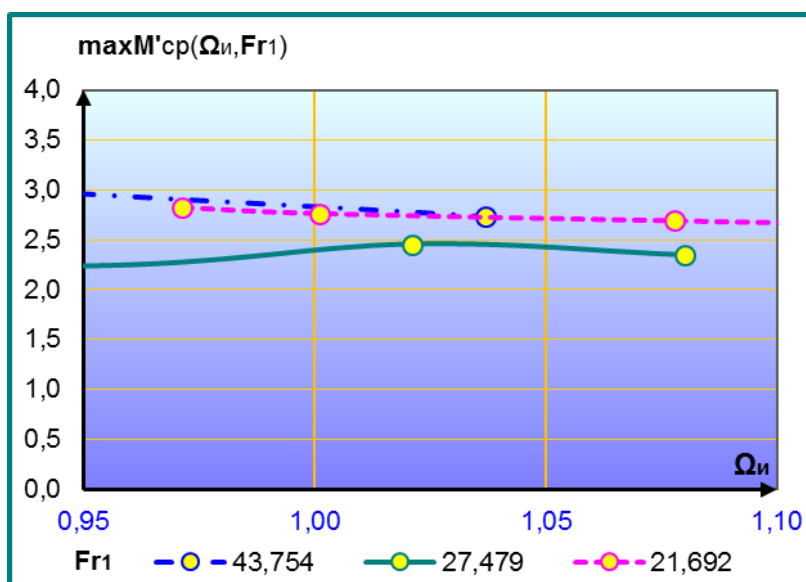


Слика 4.121 Слагање сила од пулзација (F') добијених различитим методама, прорачуна на моделу ГФ-2V

Утицаји на зидове умирујућег базена су у сагласности са свим закључцима са модела ГФ-1M.

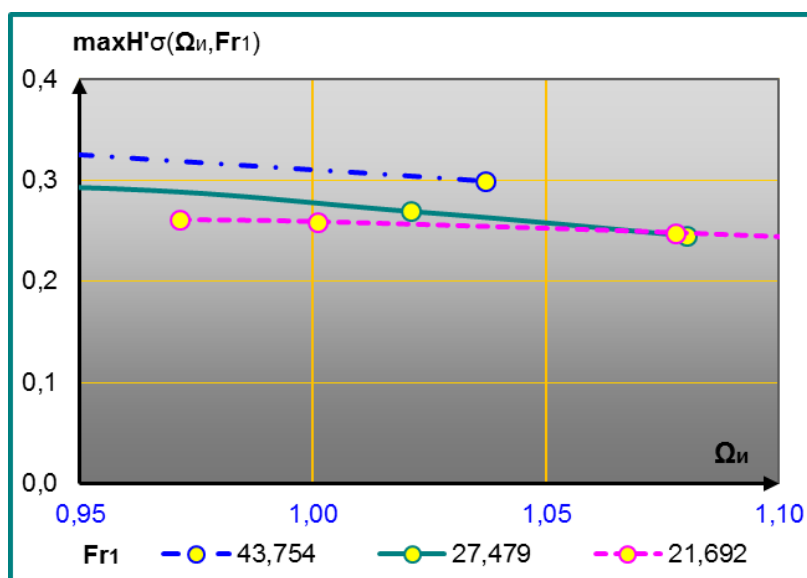


Слика 4.122 Промена максималне хоризонталне силе у уклештењу зида услед средњих притисака, у зависности од потоњености скока и Фрудовог броја на моделу ГФ-2V



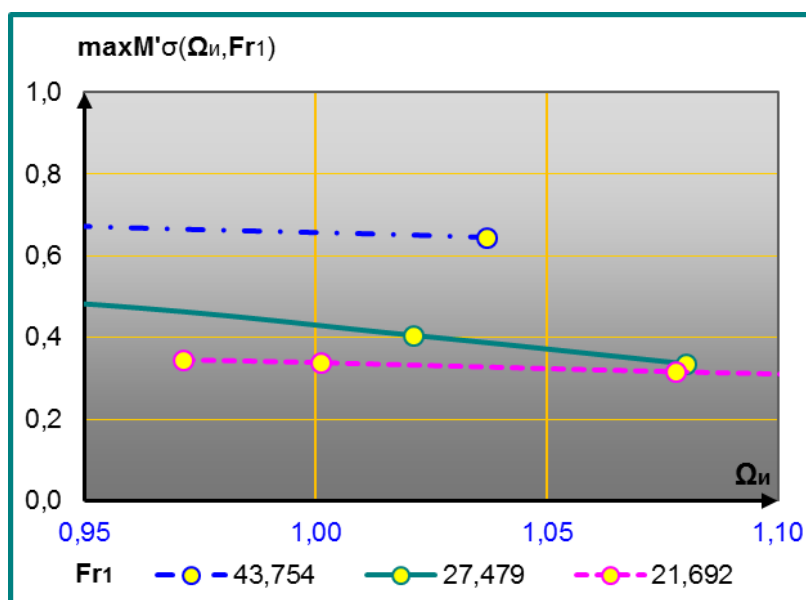
Слика 4.123 Промена максималног момента у уклештењу зида услед средњих притисака, зависно од потопљености скока и Фрудовог броја на моделу ГФ-2V

Анализом максималних утицаја од средњих притисака за различите експерименте на моделу ГФ-2V (слике 4.122 и 4.123) може се закључити да су за ниже вредности Фрудовог броја у суженом пресеку, ови утицаји незнатно већи, као и да су испод вредности од 1,75 за хоризонталне силе, односно 3,0 за моменте.



Слика 4.124 Промена максималне хоризонталне силе у уклештењу зида услед пулзација у зависности од потопљености скока и Фрудовог броја на моделу ГФ-2V

Максимални утицаји од пулзација, за ниже вредности Фрудовог броја ($Fr_1 < 30$), слабо се мењају са потопљеношћу хидрауличког скока, док се при вишим не може донети добар закључак јер је изабрани домен низводних услова, $\Omega_{II} < 1$, нереалан (слике 4.125 и 4.126).



Слика 4.125 Промена максималног момента у уклештењу зида услед пулзација у зависности од потопљености скока и Фрудовог броја на моделу ГФ-2V

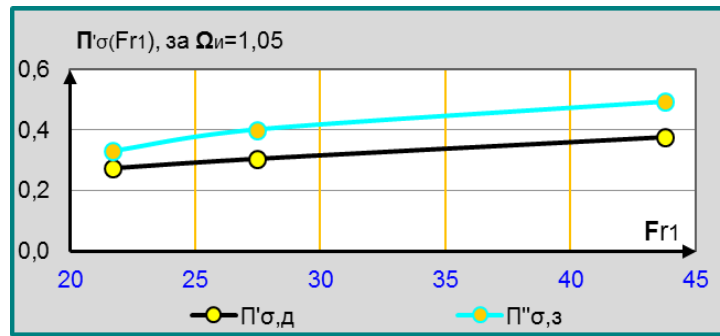
У табели 4.13 приказани су коефицијенти пригушења пулзационе силе у дну умирујућег базена, током експеримената на моделу ГФ-2V.

Табела 4.13 Коефицијенти пригушења пулзационе силе на моделу ГФ-2V

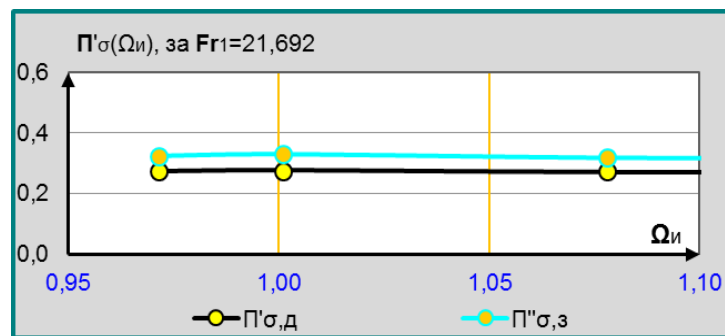
$\Pi'\sigma$	Ω_{II}	0,6579	0,8761	0,9083	1,0369
$Fr_1 =$	43,754	0,4834	0,3702	0,3758	0,3757
$\Pi'\sigma$	Ω_{II}	0,7831	0,9396	1,0210	1,0802
$Fr_1 =$	27,479	0,3714	0,3102	0,3041	0,3024
$\Pi'\sigma$	Ω_{II}	0,9713	1,0010	1,0779	1,1542
$Fr_1 =$	21,692	0,2746	0,2762	0,2728	0,2728

Ако се изврши парцијална анализа утицаја потопљености хидрауличког скока, Ω_{II} , и Фрудовог броја Fr_1 на пригушење пулзационих сила (слике 4.126 и 4.127), може се видети да и на овом моделу преовлађује узводни утицај.

На моделу ГФ-2V нису регистроване доминантне учесталости утицаја на елементе конструкције.



Слика 4.126 Промена коефицијента пригушења пулзационе силе на моделу ГФ-2V у зависности од Фрудовог броја, при истој потопљености хидрауличког скока

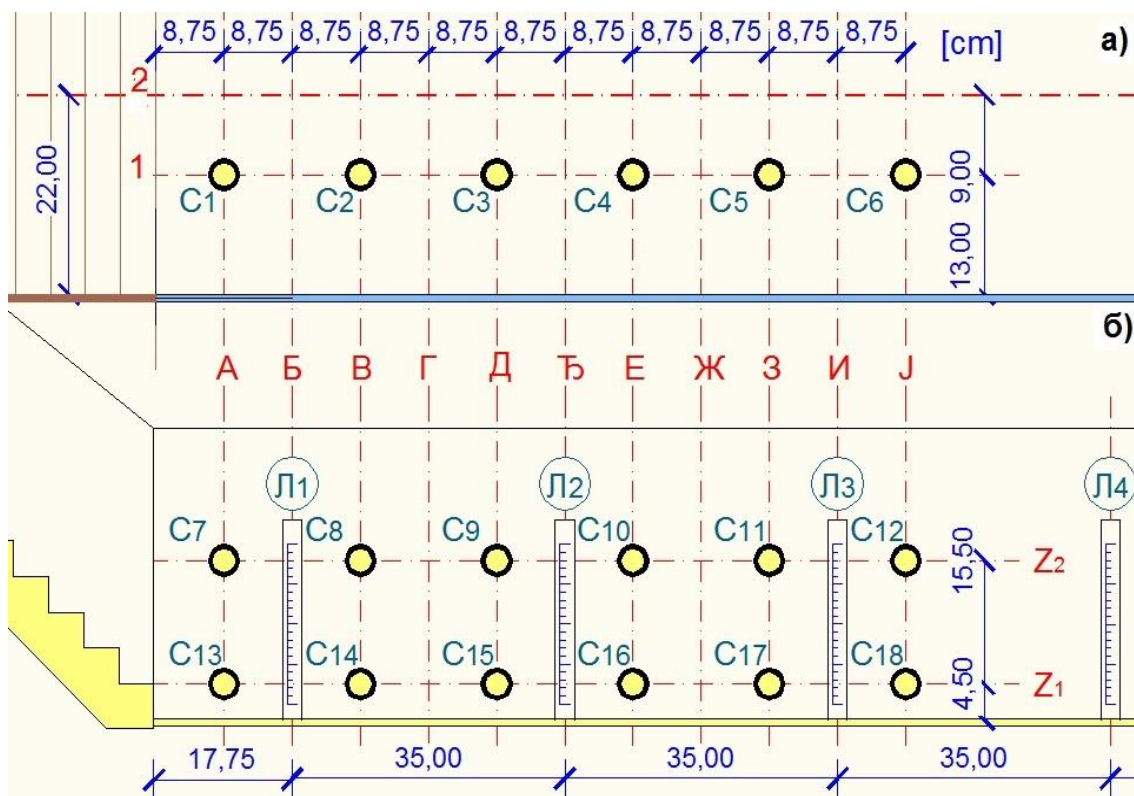


Слика 4.127 Промена коефицијента пригушења пулзационе силе на моделу ГФ-2V у зависности од потопљености хидрауличког скока при истом Фрудовом броју

4.13 Резултати мерења на моделу ГФ-3М

Модел ГФ-3М означава умирујући базен иза непризматичног брзотока са мањим степеницима. Сужење брзотока је симетрично, под углом од 15° . Ово је највеће сужење које је разматрано у истраживању. Преливна ивица на почетку брзотока је $B_D = 98$ cm, као и за све моделе, а ширина умирујућег базена је сада сужена на $B_C = 44$ cm, дакле сужење ширине на брзотоку је више од 55%. Прелаз из непризматичног брзотока у призматичан умирујући базен, ни на овом моделу није био хидраулички обликован. Узорковање је вршено са укупно 18 мерних сонди, од којих су свега 6 биле постављене у десној половини дна, а 12 на десном зиду базена. Овако слаба покривеност дна мерном опремом је имала за последицу да су добијени резултати служили првенствено за уочавање очекиваних утицаја на конструктивне елементе умирујућег базена, док су добијене вредности коришћене за проверу емпиријских израза, добијених на другим моделима, за параметре ван домена за које су одређени.

Шема постављања сонди је приказана на слици 4.128.



Слика 4.128 Распоред мерних сонди и леђира на моделу ГФ-3М

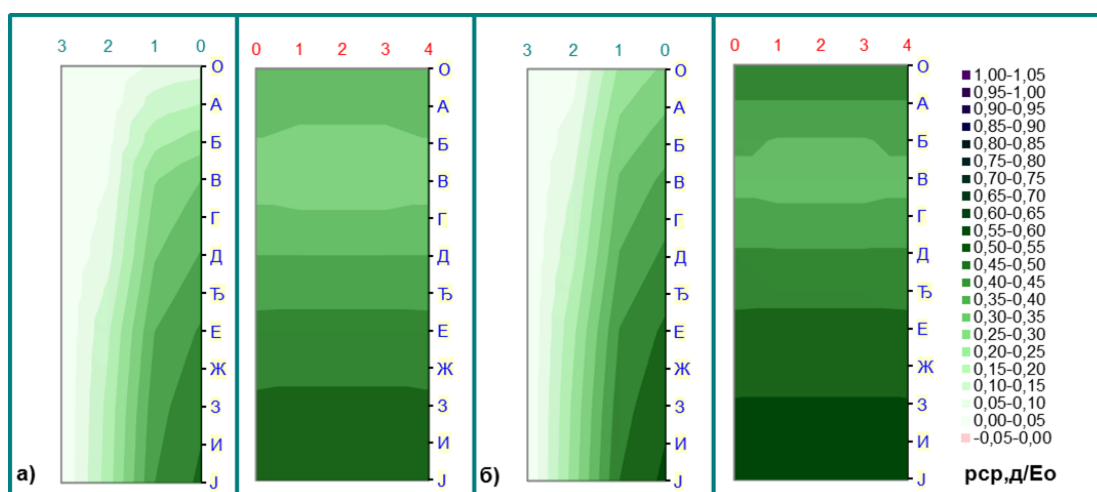
а) дно, б) зид

Табела 4.14 Резултати обраде мерних података на моделу ГФ-3М

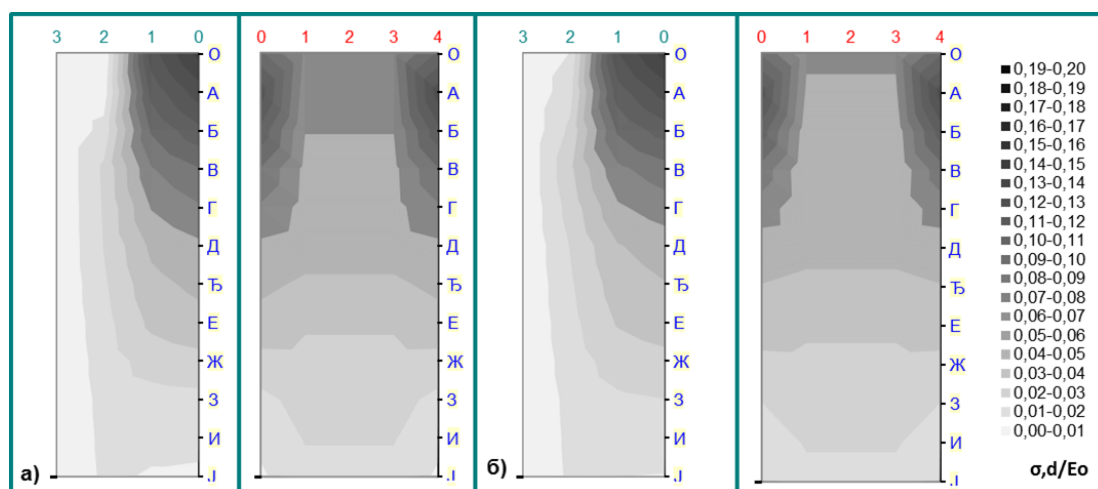
Модел 3М-	Q20h21	Q20h23	Q20h25	Q20h27	Q30h21	Q30h23	Q30h25	Q30h27	Q40h21	Q40h23	Q40h25	Q40h27
Lc [cm]	70,00	70,00	70,00	70,00	90,00	90,00	90,00	90,00	105,00	105,00	105,00	105,00
Q [l/s]	20,00	20,00	20,00	20,00	30,00	30,00	30,00	30,00	40,00	40,00	40,00	40,00
hдв [cm]	21,00	23,00	25,00	27,00	21,00	23,00	25,00	27,00	21,00	23,00	25,00	27,00
Eo [cm]	29,71	29,71	29,71	29,71	36,48	36,48	36,48	36,48	43,01	43,01	43,01	43,01
Fг1	29,947	29,947	29,947	29,947	26,879	26,879	26,879	26,879	25,681	25,681	25,681	25,681
Qи	1,5087	1,6511	1,7754	1,9238	1,1676	1,3593	1,4158	1,5313	1,0433	1,1426	1,1524	1,2968
N	0,9309	0,9328	0,9374	0,9157	0,9571	0,9421	0,9548	0,9456	0,9588	0,9580	0,9483	0,9495
F'ср,д	0,8800	0,9155	0,9205	0,9076	0,7990	0,8298	0,8617	0,8837	0,7802	0,8140	0,8908	0,8767
F'σ,д	0,0599	0,0503	0,0424	0,0377	0,0779	0,0667	0,0588	0,0497	0,0993	0,0789	0,0647	0,0593
F*σ,д	0,0599	0,0509	0,0426	0,0383	0,0781	0,0669	0,0590	0,0497	0,0993	0,0789	0,0647	0,0593
F'ср,ду	0,7778	0,8219	0,8332	0,8257	0,7588	0,8077	0,8579	0,8926	0,5848	0,6434	0,7382	0,7378
F'σ,ду	0,0855	0,0686	0,0594	0,0518	0,1297	0,1102	0,0934	0,0782	0,1688	0,1327	0,1102	0,0979
F*σ,ду	0,0849	0,0704	0,0598	0,0531	0,1284	0,1096	0,0930	0,0765	0,1683	0,1302	0,1076	0,0960
F'ср,дн	0,8714	0,8920	0,8890	0,8717	0,8392	0,8520	0,8655	0,8747	0,9157	0,9214	0,9736	0,9467
F'σ,дн	0,0654	0,0562	0,0469	0,0410	0,0729	0,0621	0,0587	0,0537	0,0891	0,0821	0,0649	0,0616
F*σ,дн	0,0647	0,0588	0,0472	0,0438	0,0712	0,0607	0,0578	0,0519	0,0871	0,0755	0,0588	0,0574
maxH'ср,з	1,6912	1,6994	1,6679	1,7044	1,5806	1,6129	1,6129	1,6939	1,5755	1,6091	1,6749	1,6567
maxM'ср,з	2,8896	2,9054	2,8181	2,9134	2,5995	2,6668	2,6659	2,8739	2,5557	2,6326	2,7909	2,7398
maxH'σ,з	0,1093	0,0915	0,0646	0,0530	0,2288	0,1525	0,1136	0,0881	0,2224	0,2260	0,1807	0,1358
maxM'σ,з	0,1412	0,0945	0,0653	0,0430	0,2724	0,1847	0,1498	0,1065	0,2837	0,2582	0,2175	0,1871

У табели 4.14 приказани су најважнији резултати добијени обрадом измерених података. Може се одмах уочити да је домен изабраних потоцљености хидрауличког скока веома широк, и да у зони великих Фрудових бројева одговара режиму рада базена познатом као „навучени скок“.

Слика расподеле утицаја од средњих притисака и пулзација на дно базена може се добити само уз претпоставку да су притисци на дно у зони уклештења једнаки одговарајућим притисцима на зиду (слике 4.129 и 4.130).



Слика 4.129 Средњи притисци на дну базена за експерименте
а) 3MQ40h21 и б) 3MQ40h23

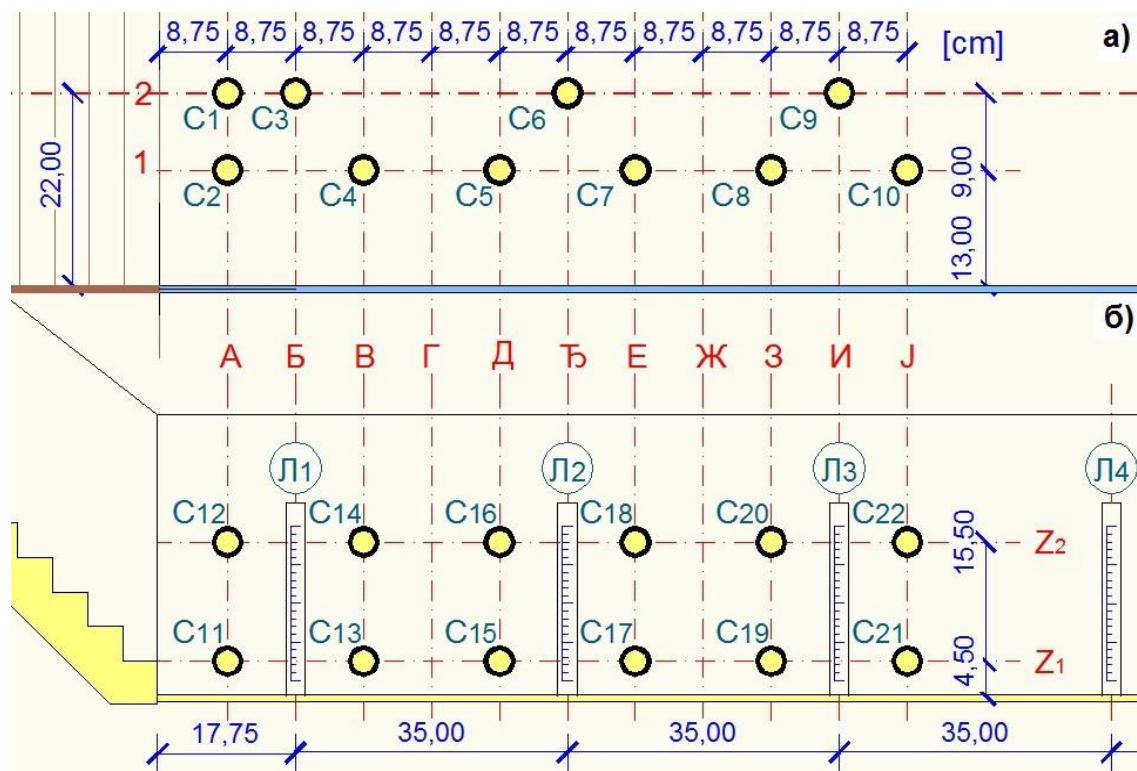


Слика 4.130 Пулзације на дну базена за експерименте
а) 3MQ40h21 и б) 3MQ40h23

За разлику од дна, на зиду је било довољно мерних сонди па добјени резултати омогућавају ваљану анализу. Резултати мерења утицаја на зиду умирујућег базена на моделу ГФ-3М, као и њихова анализа, се потпуно уклапају у закључке са претходних модела.

4.14 Резултати мерења на моделу ГФ-3V

Умирујући базен модел ГФ-3V је потпуно идентичан моделу ГФ-3М. Разлика је у величини степеника на брзотоку, који су два пута већи. Шема постављања сонди је измењена. У дну је повећан број мерних сонди на 10, што је био максимум могућности физичког модела. Међутим и таква мерна инсталација је, сем у најузводнијем имала само по једну мерну сонду у попречним пресецима базена, а на основу једног податка није могуће стећи слику о попречној расподели средњих притисака, а посебно не пулзација, за које се на основу аналогије са другим моделима у истраживању очекује знатна попречна прерасподела. Положај мерних сонди и лењира у умирујућем базену приказан је на слици 4.131.



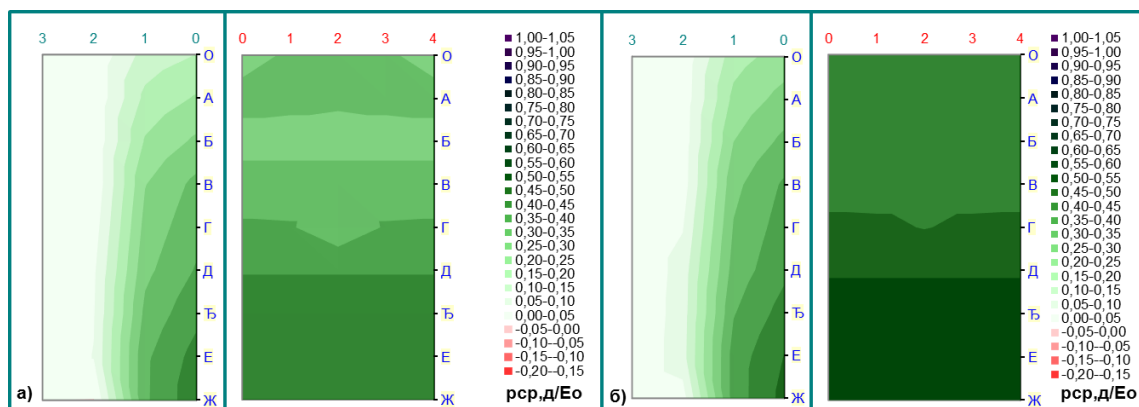
Слика 4.131 Распоред мерних сонди и лењира на моделу ГФ-3V
а) дно, б) зид

Добијени резултати на овом моделу приказани су у табели 4.17.

Табела 4.15 Резултати обраде мерних података на моделу ГФ-3V

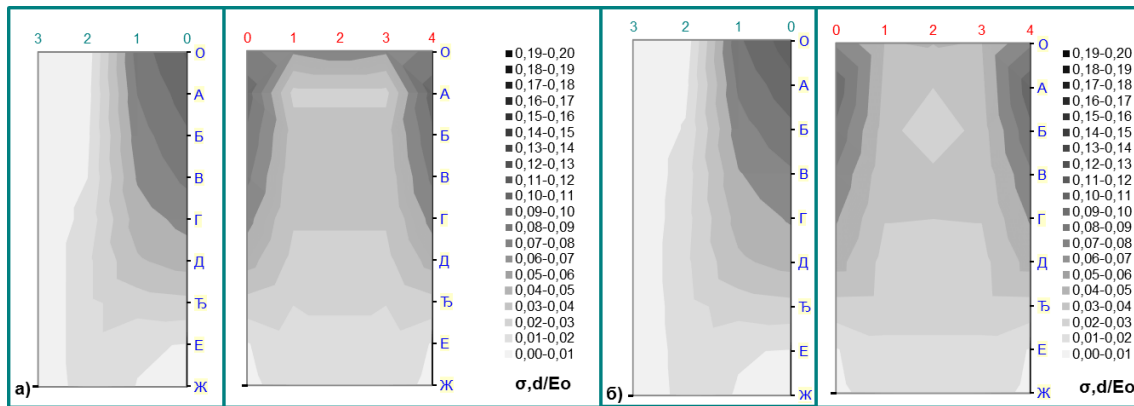
Модел 3V-	Q20h13	Q20h14	Q20h15	Q20h16	Q40h20	Q40h21	Q40h22	Q40h23	Q60h25	Q60h26	Q60h27	Q60h28
Lc [cm]	70,00	70,00	70,00	70,00	105,00	105,00	105,00	105,00	130,00	130,00	130,00	130,00
Q [l/s]	20,00	20,00	20,00	20,00	40,00	40,00	40,00	40,00	60,00	60,00	60,00	60,00
hдв [cm]	13,00	14,00	15,00	16,00	20,00	21,00	22,00	23,00	25,00	26,00	27,00	28,00
Eo [cm]	33,16	33,16	33,16	33,16	39,15	39,15	39,15	39,15	45,16	45,16	45,16	45,16
F _{г1}	35,871	35,871	35,871	35,871	21,889	21,889	21,889	21,889	17,529	17,529	17,529	17,529
Ω _и	0,8581	0,9654	1,0140	1,1105	0,9612	1,0109	1,0940	1,1258	0,9455	0,9931	1,0320	1,1246
N	0,9575	0,9635	0,9510	0,9569	0,9618	0,9560	0,9618	0,9610	0,9365	0,9659	0,9681	0,9646
F _{ср,д}	0,7740	0,8670	0,9308	0,9762	0,8278	0,8712	0,9193	0,8895	0,8105	0,8761	0,8691	0,8902
F [*] _{σ,д}	0,1111	0,0934	0,0822	0,0722	0,0833	0,0747	0,0635	0,0621	0,0845	0,0739	0,0696	0,0654
F [*] _{σ,д}	0,1103	0,0934	0,0821	0,0729	0,0835	0,0747	0,0635	0,0622	0,0831	0,0728	0,0695	0,0644
F _{ср,ду}	0,5811	0,7270	0,8211	0,8853	0,6965	0,7681	0,8332	0,8092	0,6937	0,7866	0,7909	0,8233
F _{σ,ду}	0,1824	0,1531	0,1338	0,1166	0,1477	0,1281	0,1067	0,1050	0,1349	0,1152	0,1045	0,0974
F [*] _{σ,ду}	0,1825	0,1522	0,1323	0,1162	0,1447	0,1267	0,1051	0,1034	0,1322	0,1140	0,1033	0,0950
F _{ср,дн}	0,9669	1,0070	1,0405	1,0670	0,9590	0,9744	1,0055	0,9698	0,9274	0,9656	0,9474	0,9571
F _{σ,дн}	0,1316	0,1136	0,0997	0,0882	0,0821	0,0763	0,0696	0,0669	0,1085	0,0932	0,0913	0,0934
F [*] _{σ,дн}	0,1239	0,1084	0,0972	0,0882	0,0767	0,0743	0,0670	0,0651	0,0951	0,0854	0,0889	0,0833
maxH [*] _{ср,з}	1,5617	1,7005	1,6065	1,4920	1,4645	1,8574	1,5038	1,5071	1,9318	1,9058	1,4085	1,4088
maxM [*] _{ср,з}	2,6368	2,9313	2,6892	2,3993	2,2856	3,8192	2,3674	2,3724	3,4474	3,3747	2,1362	2,1375
maxH [*] _{σ,з}	0,3206	0,3294	0,3223	0,2561	0,2506	0,2720	0,2727	0,2515	0,4633	0,2529	0,2664	0,2711
maxM [*] _{σ,з}	0,8467	0,6268	0,6450	0,4598	0,3365	0,2972	0,2719	0,2507	1,8478	0,3041	0,4085	0,2569

У табели 4.17 приказани су најважнији резултати добијени на моделу ГФ-3V. На овом моделу је избор потошњености углавном усклађен са доменом у коме су вршена истраживања на моделима са мањим сужењем брзотока. Резултати добијени на моделу ГФ-3V биће првенствено коришћени за контролу емпиријских израза изведених на другим моделима.



Слика 4.132 Средњи притисци на дну базена за експерименте
а) 3MV20h14 и б) 3MV20h16

И на овом моделу, слика расподеле утицаја од средњих притисака и пулзација на дну базена, може се добити само уз претпоставку да су притисци на дну у зони уклештења једнаки одговарајућим притисцима на зиду, као и за модел ГФ-3М (слике 4.132 и 4.133).



Слика 4.133 Пулзације на дну базена за експерименте
а) 3MV20h14 и б) 3MV20h16

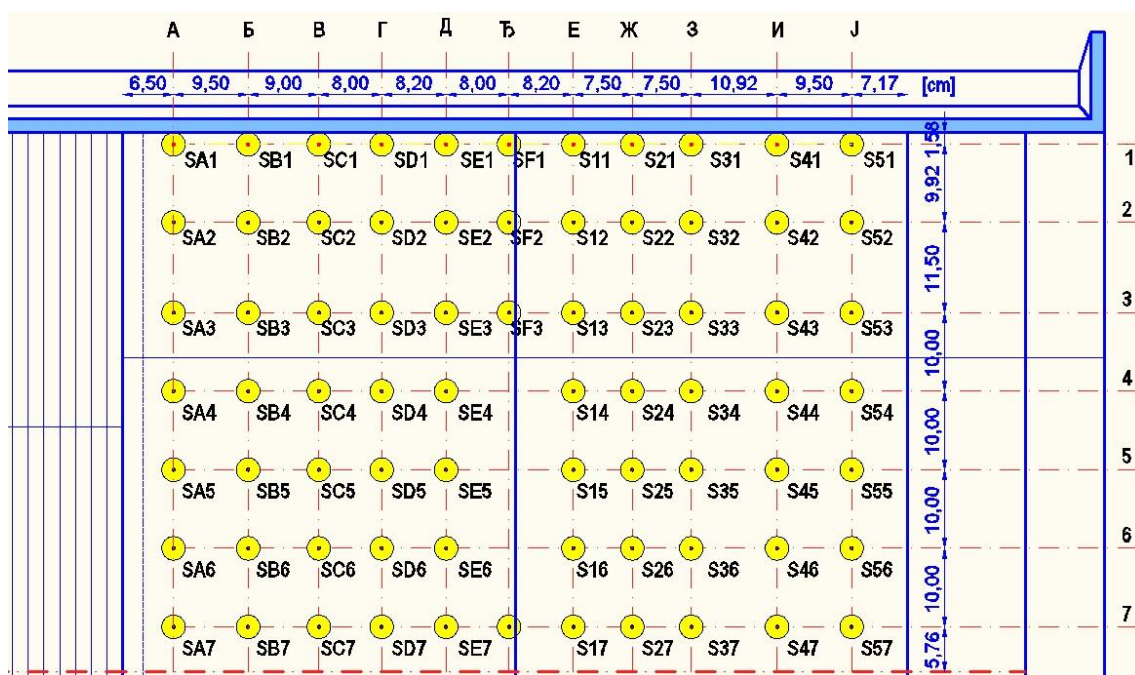
Резултати анализе на зиду, где је било довољно мерних сонди, се потпуно уклапају у закључке истраживања на претходним моделима.

4.12 Резултати мерења на моделу „Бузина“

У Заводу за хидраулику Института за водопривреду „Јарослав Черни“ изграђен је хидраулички модел бране Бузина, у размери за дужине 1:40. Програм испитивања на овом хидрауличком моделу обухватио је мерења и анализу великог броја карактеристичних величина, ради што бољег сагледавања сложених услова течења, који се могу јавити на објекту. Један од задатака је био и анализа хидродинамичких притисака на плоче дна умирујућег базена.

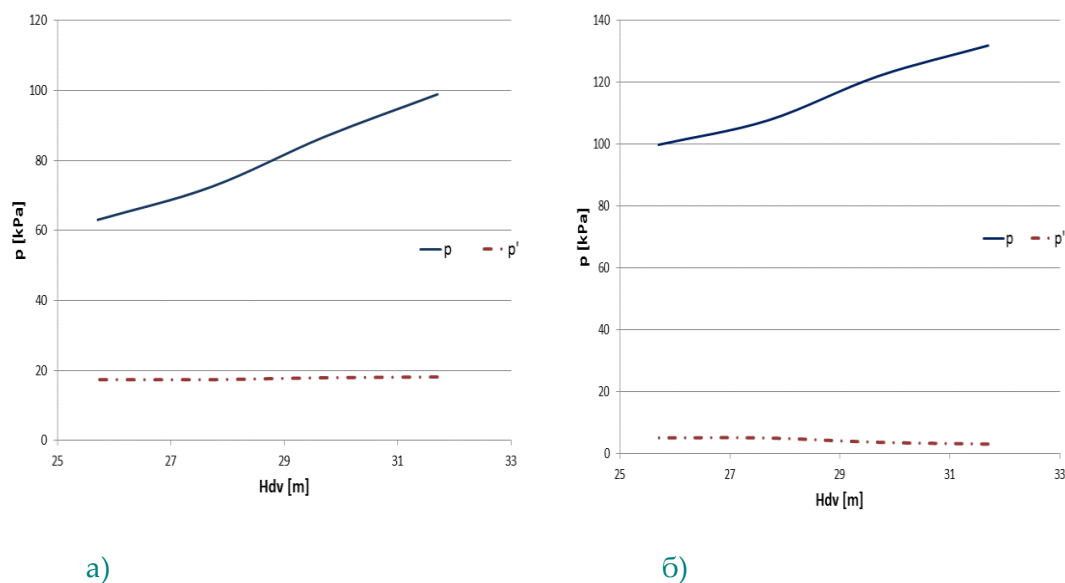
У оквиру анализе осетљивости средњих притисака и пулзација на промене нивоа доње воде извршена су мерења на плочама у дну, при константном протоку од $Q_{max} = 1320 \text{ m}^3/\text{s}$ и дубинама доње воде (изражених помоћу релативних кота нивоа у односу на дно слапишта: $Z_{ДВ1} = 10,10 \text{ m}$, $Z_{ДВ2} = 12,10 \text{ m}$, $Z_{ДВ3} = 14,10 \text{ m}$, $Z_{ДВ4} = 16,10 \text{ m}$).

За потребе ових мерења, у дну базена постављен је велики број мерних сонди (слика 4.134), како би се добила што боља представа о распореду притисака дуж карактеристичних пресека. Промена притиска на мерном месту претворена је давачем – сондом у промену електричног напона, одакле је путем аквизиције складиштена у одговарајућу базу података. Мерења су вршена са временским кораком од 0,005 s у трајању од 500 s.



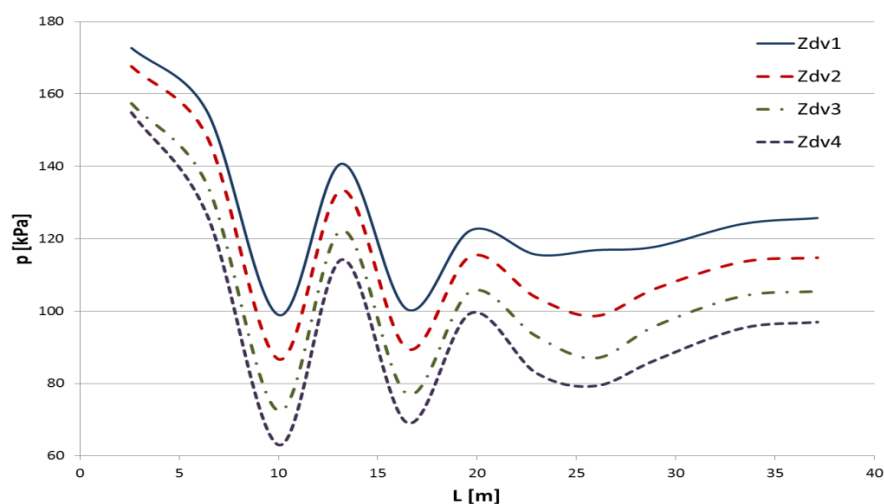
Слика 4.134 Распоред мерних сонди на хидрауличком моделу бране „Бузина“

Мерењима су регистровани средњи притисци у умирујућем базену, за максималан протицај преко прелива, а при различитим нивоима доње воде. Измерене величине су статистички обрађене.



Слика 4.135 Промена средњих притисака и пулзација на мерном месту непосредно иза брзотока (а) и на излазу из слапишта (б)

Анализом добијених резултата на мерним местима (непосредно иза брзотока уз зид, и на крају базена у средини) може се закључити да средњи притисци расту са повећањем нивоа доње воде, што је и очекивано (слика 4.135). Са друге стране, вредности пулзација највише зависе од положаја мерног места.

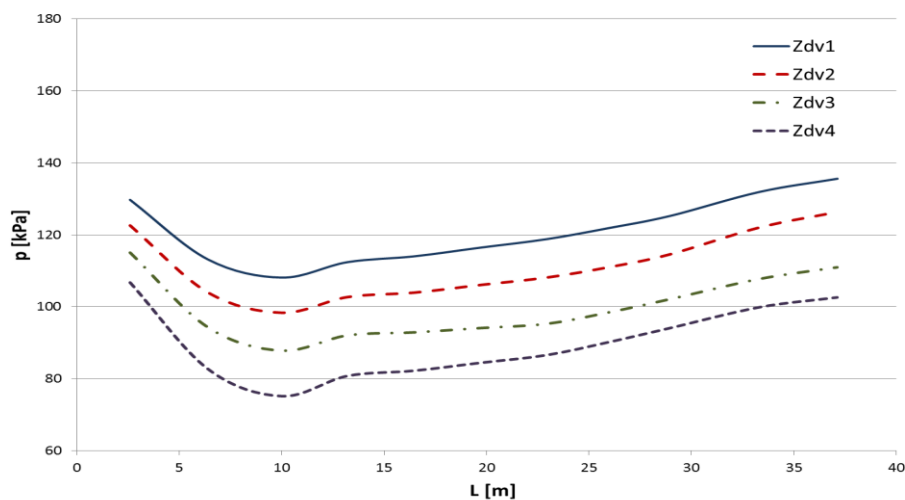


Слика 4.136 Промена средњих притисака дуж умирујућег базена, пресек уз леви зид

Ако се посматрају промене средњег притиска дуж умирујућег базена (слике 4.136 и 4.137), уочава се другачији карактер промена на средини, у односу на промене уз зидове, што је последица сложених струјања с обзиром да се на боковима базена појављују вртлози са вертикалном осовином. Наиме, непризматичност брзотока изазива неравномеран распоред протока на низводном крају брзотока, односно на улазу у умирујући базен. Релативно широки базен омогућава настанак просторног струјања, које је израженије уз зидове него по средини.

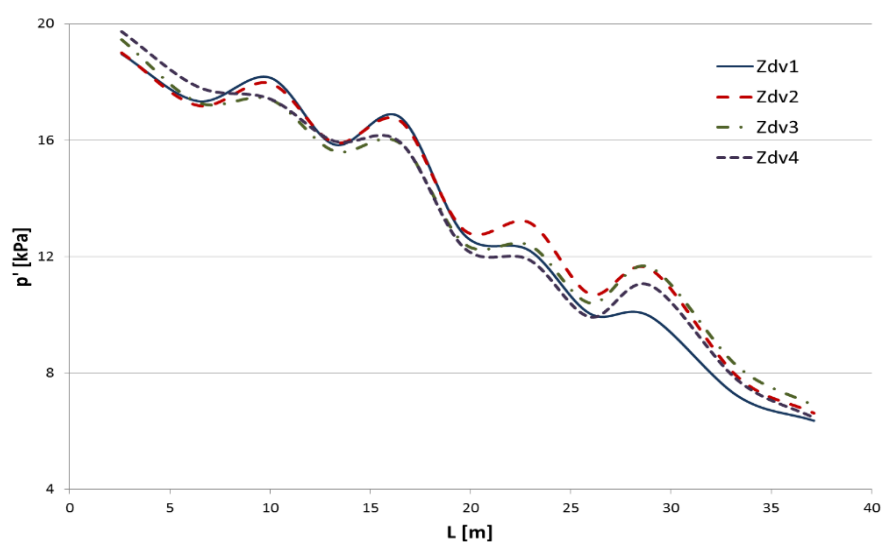
Ово је битна разлика у односу на мерења која су вршена на моделима ГФ, јер више није задовољена претпоставка о једнакости нивоа у попречним пресецима, те се стога може очекивати извесно неслагање резултата утицаја добијених испитивањем на хидрауличком моделу „Бузина“ и оних одређених емпиријским изразима одређеним на моделу ГФ.

У целом базену средњи притисци расту са повећањем нивоа доње воде.

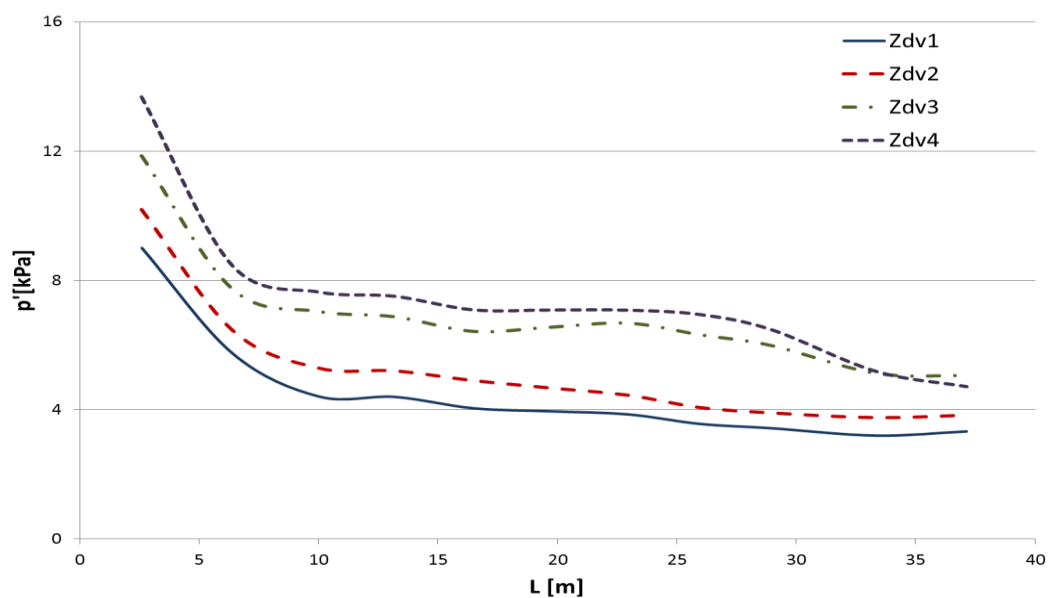


Слика 4.137 Промена средњих притисака дуж умирујућег базена, пресек по средини

Вредности пулзација притисака опадају дуж тока (слике 4.138 и 4.139), као и са повећањем нивоа доње воде. Пулзације су значајно веће уз зидове него по средини, као последица поменутог просторног струјања. На низводном крају умирујућег базена вредности пулзација се изједначавају по целом попречном пресеку.



Слика 4.138 Промена пулзација притисака дуж пресека уз зид базена



Слика 4.139 Промена пулзационог притисака дуж слапишта,
пресек по средини слапишта

Ово је у потпуности сагласно са закључцима изведеним на моделима
ГФ, са непризматичним брзотоком.

5 РЕГРЕСИОНА АНАЛИЗА

5.1 Циљ регресионе анализе

Примарни циљ истраживања је поуздана процена следећих величина (утицаја) на дно и зидове умирујућег базена ради конструктивног обликовања АБ елемената.

1. вертикална сила од средњих притисака на половини дна базена;
2. вертикална сила од пулзација на половини дна базена;
3. вертикална сила од средњих притисака на узводној четвртини дна базена;
4. вертикална сила од пулзација на узводној четвртини дна базена;
5. вертикална сила од средњих притисака на низводној четвртини дна базена;
6. вертикална сила од пулзација на низводној четвртини дна базена;
7. максимална хоризонтална сила од средњих притисака у уклештењу зида умирујућег базена;
8. максимални моменат од средњих притисака у уклештењу зида умирујућег базена;
9. максимална хоризонтална сила од пулзација у уклештењу зида умирујућег базена;
10. максимални моменат од пулзација у уклештењу зида умирујућег базена.

Ови утицаји су одређени на физичком моделу за релевантна геометријске величине модела (сужење брзотока θ , висина степеника на брзотоку, h_c , односно релативна храпавост брзотока χ , ширина умирујућег базена, b_c , дужина умирујућег базена, L_c) и различите параметре течења (проток, Q , преостала енергија на крају брзотока, E_0 , Фрудов број Fr_1 у суженом пресеку, потоцљеност хидрауличног скока на крају базена, Ω_n). Регресиона анализа има за циљ да повеже силе и моменте на елементима конструкције умирујућег базена са параметрима који описују геометрију и услове течења, помоћу вредности измерених током експеримента.

Да би емпиријски изрази добијени регресионом анализом, били ваљани, морају имати следеће особине:

1. да буду општи, односно да имају бездимензионалне параметре од којих зависе;
2. да буду употребљиви, тј. да зависе од величина које се задају, или усвајају при пројектовању;
3. да имају јасно дефинисан домен применљивости.

Избор параметара коришћених у емпиријским изразима је извршен на основу изведене димензионе анализе (4.20). Тада је показано да су спроведени експерименти потпуно дефинисани са: сужењем брзотока, храпавошћу брзотока, Фрудовим бројем у суженом пресеку и потопљеношћу хидрауличког скока. Дакле, постоје четири независна бездимензионална параметра за емпиријске изразе, што је са становишта инжењерске праксе, велики број.

Анализа резултата испитивања, посебно разматрање варијација утицаја при фиксираним вредностима појединих параметара, показала је да су угао сужења, и храпавост брзотока параметри од којих доминантно зависи расподела оптерећења, а самим тиме и тражени утицаји у умирујућем базену. Такође, утврђена је и зависност утицаја од Фрудовог броја у суженом пресеку и од потопљености хидрауличког скока.

Како су прве две величине (сужење и храпавост) узводни услови, за описивање проблема неопходан је и низводни услов, па се избор трећег параметра регресионе анализе свео на потопљеност хидрауличког скока. На тај начин је Фрудов број искључен из регресионе анализе, што ће свакако утицати на тачност, па ће у приказу резултата посебно бити приказан и домен емпиријских израза услед овог занемаривања.

Усвојени параметри су погодни и са становишта употребљивости, јер претстављају величине које се усвајају приликом пројектовања.

Због усклађивања са потребама пројектантске праксе, регресиона анализа је, , различито спроведена за утицаје у дну, где су одређивани емпиријски изрази за вредност вертикалне силе, и утицаје на зидове, где је одређивана обвојница за максималне утицаје у уклештењу зида. Није

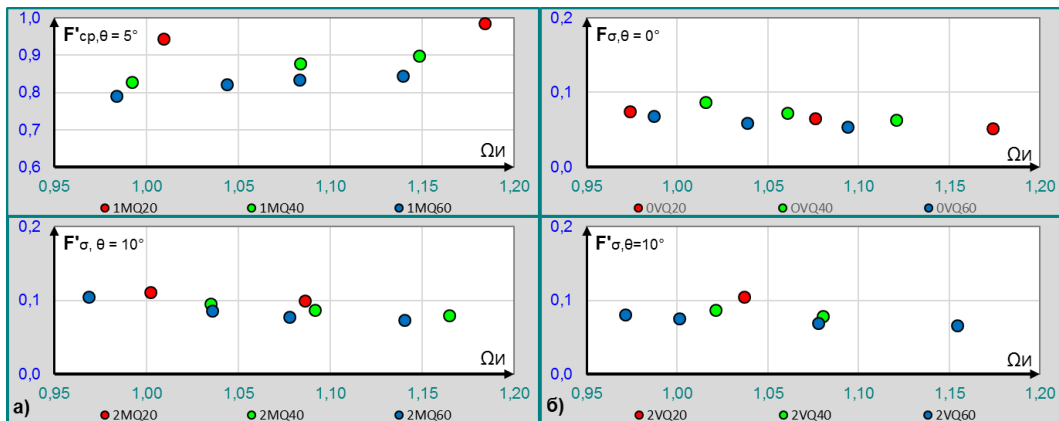
познато да су утицаји у уклештењу зида базена, до сада били предмет истраживања.

Домен истраживања је у највећем броју експеримената био:

1. за θ (0, 5, 10 и 15),
2. за χ (0,15 ÷ 0,40),
3. за Fr_1 (20 ÷ 70),
4. за Ω_{II} (0,9 ÷ 1,2),

За регресиону анализу је усвојен следећи домен:

1. за θ (0, 5 и 10),
2. за χ (0,15 ÷ 0,4),
3. за Fr_1 (20 ÷ 50),
4. за Ω_{II} (1,0 ÷ 1,2),.



Слика 5.1 Расподела утицаја у зависности од потопљености хидрауличког скока
а) вертикална сила од средњих притисака, б) вертикална сила од пулзација

На графицима мерних резултата по моделима (слика 5.1), за већину анализираних утицаја, могла се уочити изражена линеарна расподела у односу на промену потопљености скока у умирујућем базену. Стога је усвојено да је база за емпиријске изразе линеарна функција:

$$Y' = A \cdot \Omega_{II} + B, \quad (5.1)$$

где су A и B базни и диференцијални члан израза, који се састоје од корекционих коефицијената услед вредности угла сужења брзотока θ , C_{θ_0} и

C_θ , односно храпавости χ , $C_{\chi\theta}$ и C_χ , при чему је храпавост дефинисана преко преостале енергије на брзотоку:

$$\chi = h_c / E_0. \quad (5.2)$$

Поред наведених, у емпиријским изразима, код којих сложеност зависности то изискује, појављују се и коефицијенти $C_{\chi\theta\theta}$ који зависе од оба узводна параметра, односно C_Ω који зависи од низводног параметра.

5.2 Вертикална сила од средњих притисака на половини дна базена

Вертикална сила од средњих притисака на плочу у десној (а због симетрије и у левој) половини умирујућег базена може се проценити као:

$$F'_{cp} = C_o \cdot C_{\chi\theta} \cdot C_{\theta\theta} \cdot C_{\chi\theta\theta} + (\Omega_{II} - \Omega_{IIo}) \cdot C_\Omega \cdot C_\chi \cdot C_\theta, \quad (5.3)$$

где су базни коефицијенти: $C_o = 0,759,$ (5.4)

$$C_{\chi\theta} = 1 + 0,134 \cdot \frac{(\chi - 0,18)}{0,18}, \quad (5.5)$$

$$C_{\theta\theta} = 1 + 0,081 \cdot e^{-|\theta-5|}, \quad (5.6)$$

$$C_{\chi\theta\theta} = 1 + \frac{(3 \cdot 0,18 - 2 \cdot \chi)}{0,18} \cdot 0,093 \cdot e^{-|\theta-5|}, \quad (5.7)$$

референтна вредност потољености хидрауличког скока:

$$\Omega_{IIo} = 1,112, \quad (5.8)$$

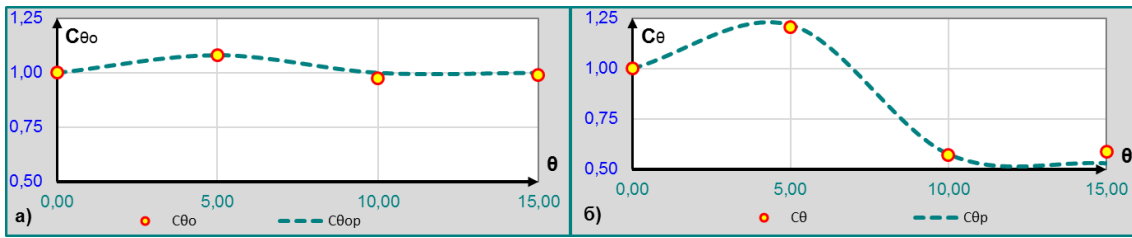
а диференцијални коефицијенти:

$$C_\Omega = 0,873, \quad (5.9)$$

$$C_\chi = 1 + 0,406 \cdot \frac{(\chi - 0,18)}{0,18}, \quad (5.10)$$

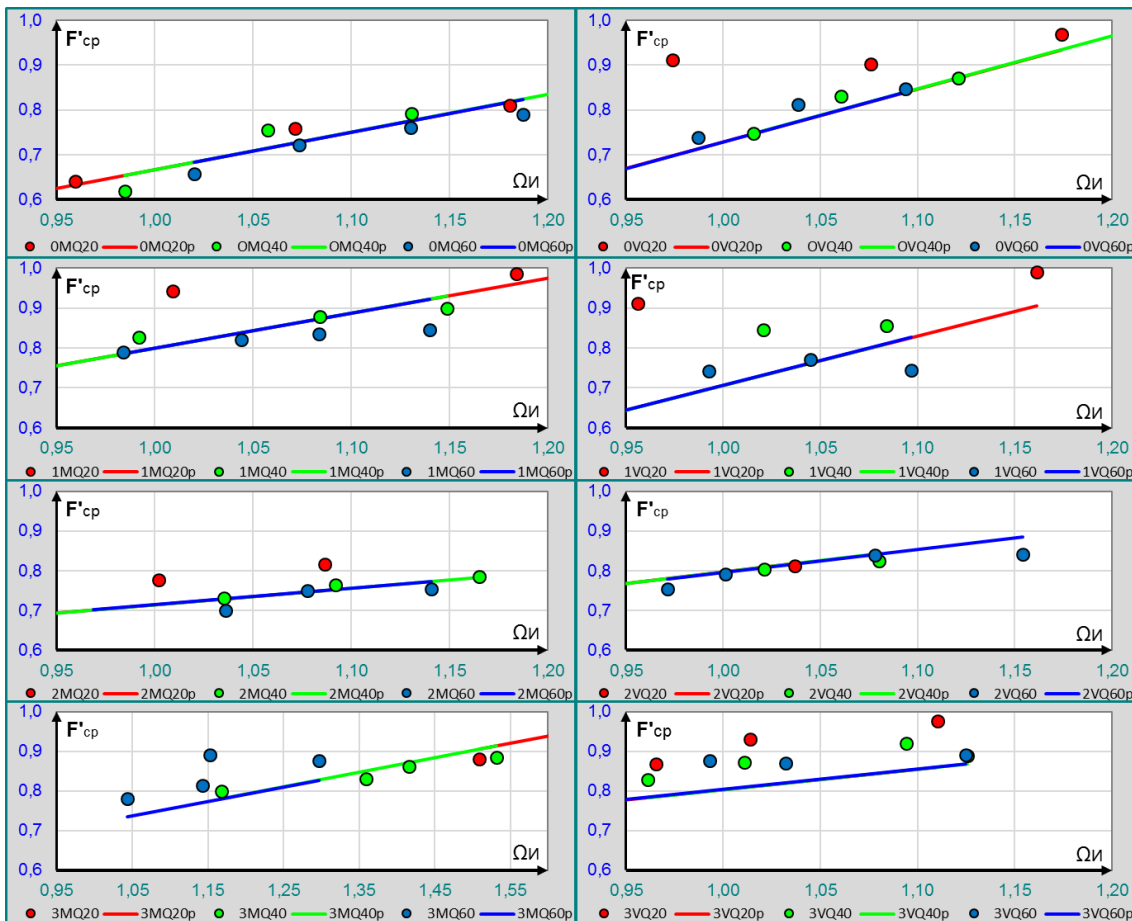
$$C_\theta = 1 + 0,478 \cdot e^{-|\theta-5|} - \frac{0,573 \cdot \theta^{0,25}}{2}. \quad (5.11)$$

Коефицијенти $C_{\theta\theta}$ и C_θ су приказани на слици 5.2:



Слика 5.2 Коефицијент утицаја сужења брзотока на вертикалну силу од средњих притисака за половину базена: а) базни и б) диференцијални

Верификација усвојеног емпиријског израза са одговарајућим вредностима добијеним и на проширеном домену параметара који су анализирани током експериментима, приказана је на слици 5.3. Боје линије емпиријског израза, као и тачака за вредности добијене током одговарајућих експеримената се односе на различите вредности Фрудовог броја. Може се уочити да значајнија одступања постоје само за експерименте Q20, тј. за проток од $Q = 20$ l/s, што одговара високим Фрудовим бројевима $Fr_1 > 50$.



Слика 5.3 Верификација емпиријског израза за вертикалну силу од средњих притисака на половини дна базена са резултатима мерења на моделима

5.3 Вертикална сила од пулзација на половини дна базена

Вертикална сила од пулзација на плочу у десној (а и левој) половини умирујућег базена, може се добити помоћу израза:

$$F'_\sigma = C_o \cdot C_{\chi^o} \cdot C_{\theta^o} \cdot C_{\chi^{\theta^o}} - \frac{(\Omega_{II} - \Omega_{IIo})}{\Omega_{II}^2} \cdot C_\Omega \cdot C_\theta, \quad (5.12)$$

где су базни коефицијенти: $C_o = 0,07$, (5.13)

$$C_{\chi^o} = 1 - 0,153 \cdot \frac{(\chi - 0,18)}{0,18}, \quad (5.14)$$

$$C_{\theta^o} = 1 + 0,045 \cdot e^{\frac{-|\theta - 9,927|^3}{90}}, \quad (5.15)$$

$$C_{\chi^{\theta^o}} = 1 - \frac{(3 \cdot 0,18 - 2 \cdot \chi)}{0,18} \cdot 0,005 \cdot e^{-|\theta - 5|}, \quad (5.16)$$

референтна вредност потопљености хидрауличког скока:

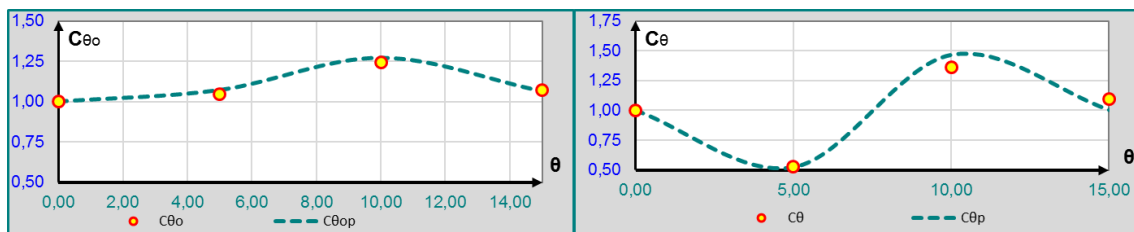
$$\Omega_{IIo} = 1,112, \quad (5.17)$$

а диференцијални коефицијенти:

$$C_\Omega = 0,167, \quad (5.18)$$

$$C_\theta = 1 + 0,499 \cdot e^{-|\theta - 9,927|} - 0,48 \cdot e^{\frac{-|\theta - 5|}{0,1}}. \quad (5.19)$$

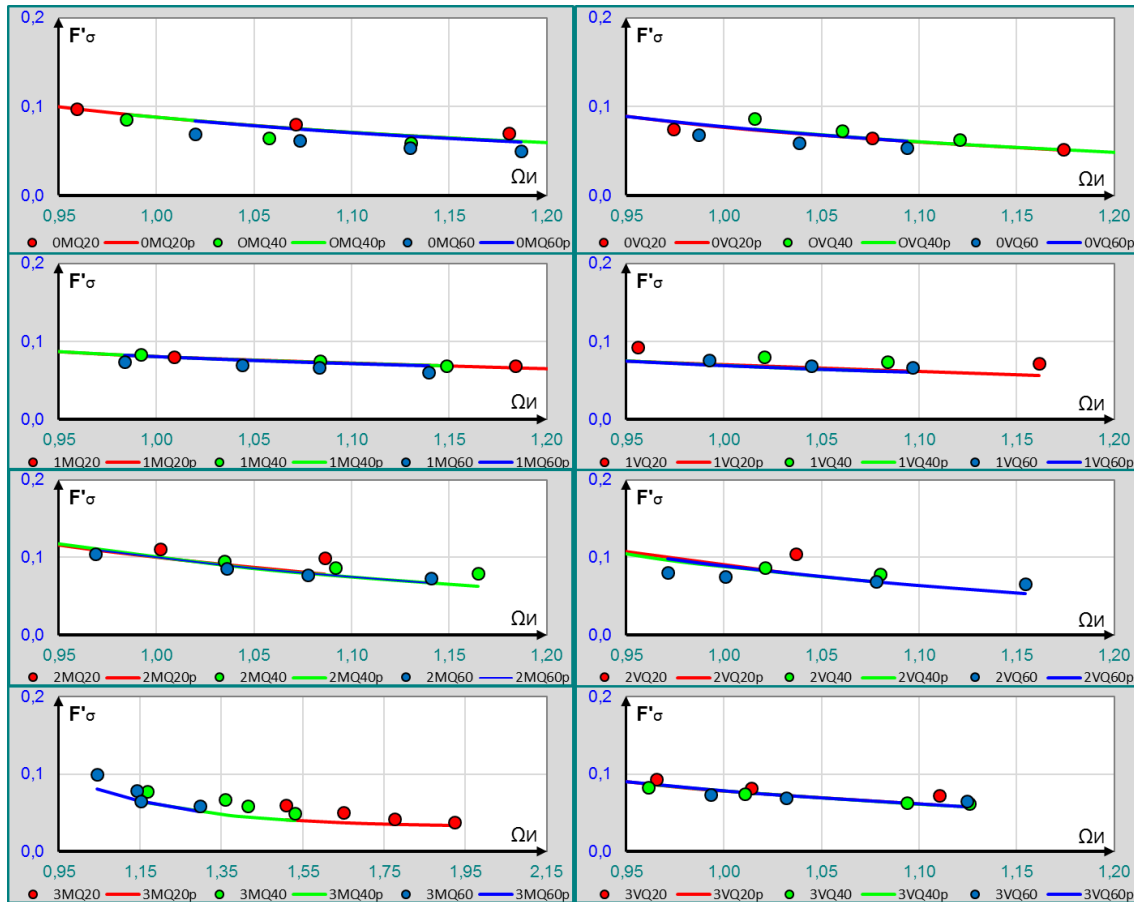
Коефицијенти C_{θ^o} и C_θ су приказани на слици 5.4:



Слика 5.4 Коефицијент утицаја сужења брзотока на вертикалну силу од пулзација за половину дна базена: а) базни и б) диференцијални

Верификација усвојеног емпиријског израза са одговарајућим вредностима добијеним на проширеном домену параметара који су анализирани током експериментима, приказана је на слици 5.5. Може се приметити да се добијени емпиријски израз уклапа у резултате добијене на моделима и за параметре изван свог усвојеног домена. Такође се види и

да се емпиријски израз може применити при свим вредностима Фрудовог броја које су коришћене у истраживању.



Слика 5.5 Верификација емпиријског израза за вертикалну силу од пулзација на половини дна базена са резултатима мерења на моделима

5.4 Вертикална сила од средњих притисака на узводној четвртини дна базена

Вертикална сила од средњих притисака на плочу у десној (а због симетрије и у левој) узводној четвртини умирујућег базена има облик:

$$F'_{cp} = C_o \cdot C_{\chi'} \cdot C_{\theta} \cdot C_{\chi\theta} + (\Omega_{II} - \Omega_{Ho}) \cdot C_{\Omega} \cdot C_{\chi} \cdot C_{\theta}, \quad (5.20)$$

где су базни коефицијенти: $C_o = 0,647,$ (5.21)

$$C_{\chi'} = 1 + 0,179 \cdot \frac{(\chi - 0,18)}{0,18}, \quad (5.22)$$

$$C_{\theta} = 1 + 0,147 \cdot e^{-|\theta-5|}, \quad (5.23)$$

$$C_{\chi\theta} = 1 + \frac{(3 \cdot 0,18 - 2 \cdot \chi)}{0,18} \cdot 0,130 \cdot e^{-|\theta-5|}, \quad (5.24)$$

референтна вредност потољености хидрауличког скока:

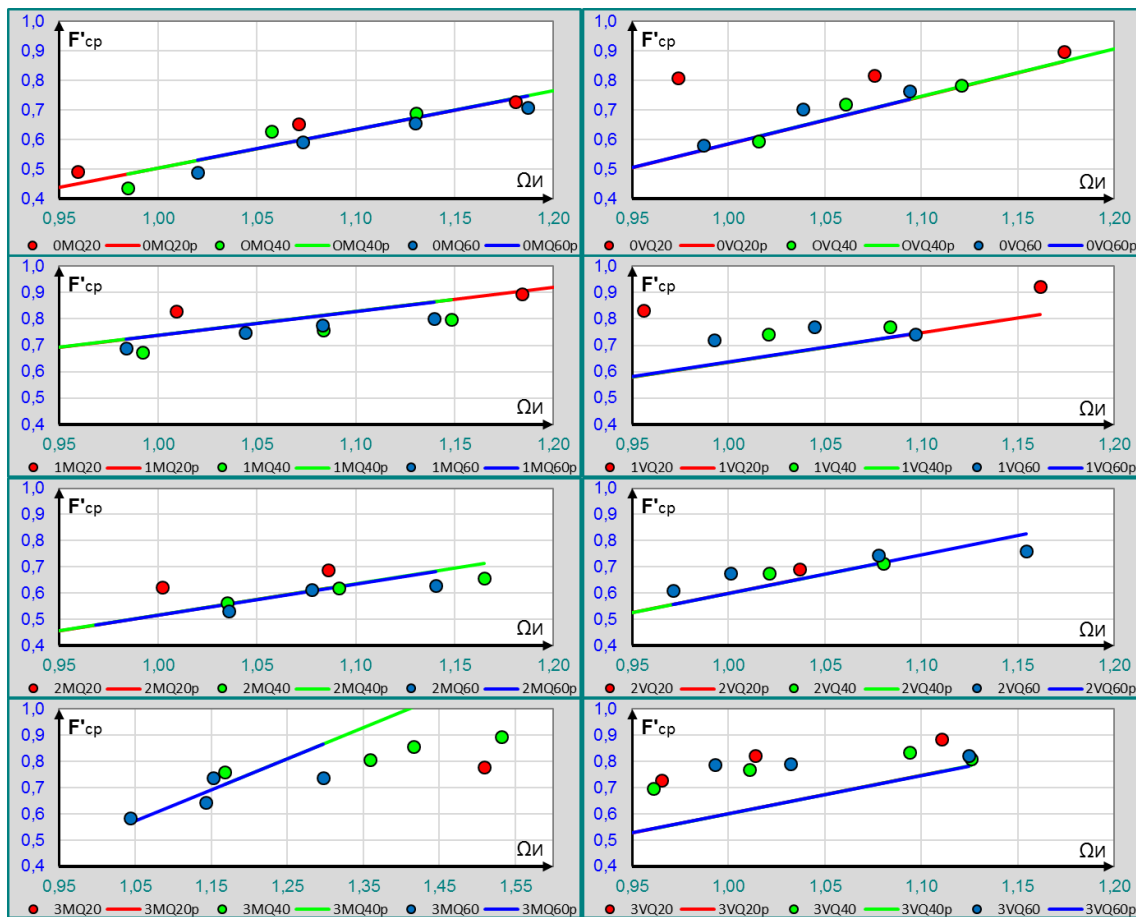
$$\Omega_{Ho} = 1,112, \quad (5.25)$$

а диференцијални коефицијенти:

$$C_{\Omega} = 1,301, \quad (5.26)$$

$$C_{\chi} = 1 + 0,236 \cdot \frac{(\chi - 0,18)}{0,18}, \quad (5.27)$$

$$C_{\theta} = 1 - 0,233 \cdot e^{-|\theta-5|} - \frac{0,092 \cdot \theta^{0,25}}{2}. \quad (5.28)$$



Слика 5.6 Верификација емпиријског израза за вертикалну силу од средњих притисака на узводној четвртини дна базена са резултатима мерења на моделима

Верификација усвојеног емпиријског израза са вредностима добијеним и на проширеном домену параметара који су анализирани,

приказана је на слици 5.6. Овај емпиријски израз је очигледно ограничен на задати домен $\Omega_{II} = (1 \div 1,2)$, и на њему може да се користи за све вредности Фрудовог броја у суженом пресеку које су коришћене у експериментима.

5.5 Вертикална сила од пулзација на узводној четвртини дна базена

Вертикална сила од пулзација на дно у десној (а и левој) узводној четвртини умирујућег базена, може се добити помоћу израза:

$$F'_\sigma = C_o \cdot C_{\chi o} \cdot C_{\theta o} \cdot C_{\chi \theta o} - \frac{(\Omega_{II} - \Omega_{IIo})}{\Omega_{II}^2} \cdot C_\Omega \cdot C_\theta, \quad (5.29)$$

где су базни коефицијенти:

$$C_o = 0,111, \quad (5.30)$$

$$C_{\chi o} = 1 - 0,101 \cdot \frac{(\chi - 0,18)}{0,18}, \quad (5.31)$$

$$C_{\theta o} = 1 + 0,158 \cdot e^{\frac{-|\theta - 9,927|^3}{90}}, \quad (5.32)$$

$$C_{\chi \theta o} = 1 - \frac{(3 \cdot 0,18 - 2 \cdot \chi)}{0,18} \cdot 0,021 \cdot e^{-|\theta - 5|}, \quad (5.33)$$

референтна вредност потоњености хидрауличког скока:

$$\Omega_{IIo} = 1,112, \quad (5.34)$$

а диференцијални коефицијенти:

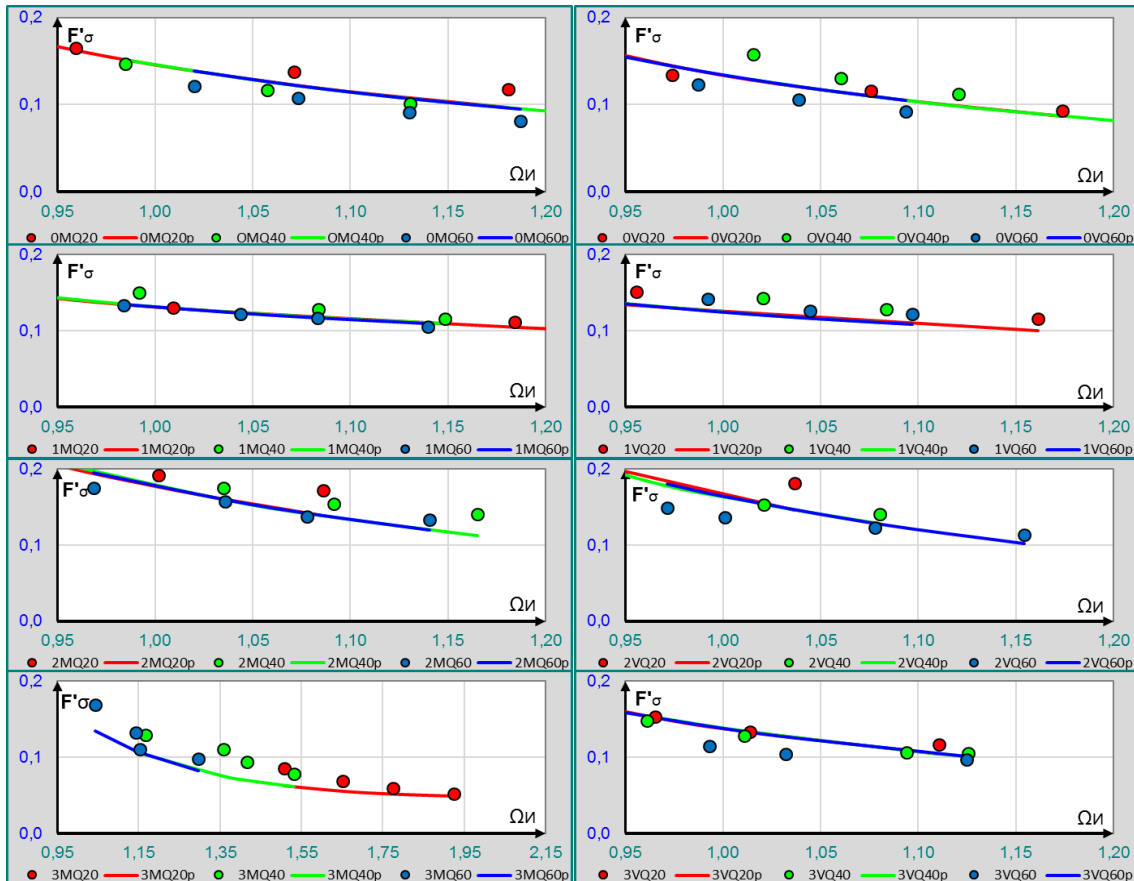
$$C_\Omega = 0,305, \quad (5.35)$$

$$C_\theta = 1 + 0,422 \cdot e^{-|\theta - 9,983|} - 0,48 \cdot e^{\frac{-|\theta - 5|}{0,1}}. \quad (5.36)$$

Верификација усвојеног емпиријског израза са одговарајућим вредностима добијеним на проширеном домену параметара који су анализирани током експериментима, приказана је на слици 5.6.

Може се приметити да се емпиријски израз прихватљиво уклапа у резултате добијене на моделима код којих су се параметри налазили изван усвојеног домена. У случају пулзација при великој потоњености хидрауличког скока, добијене вредности сила од пулзација нису на страни

сигурности, међутим те силе имају ниске вредности и нису меродавне за димензионисање умирујућег базена. Такође се види да се емпиријски израз може применити при свим вредностима Фрудовог броја у суженом пресеку које су коришћене у експериментима.



Слика 5.7 Верификација емпиријског израза за вертикалну силу од пулзација на узводној четвртини дна базена са резултатима мерења на моделима

5.6 Вертикална сила од средњих притисака низводној четвртини дна базена

Вертикална сила од средњих притисака на дно у десној (у левој) низводној четвртини умирујућег базена може се добити као:

$$F'_{cp} = C_o \cdot C_{\chi^o} \cdot C_{\theta} \cdot C_{\chi\theta} + (\Omega_{II} - \Omega_{Ho}) \cdot C_{\Omega} \cdot C_{\chi} \cdot C_{\theta}, \quad (5.37)$$

где су базни коефицијенти: $C_o = 0,872,$ (5.38)

$$C_{\chi^o} = 1 + 0,100 \cdot \frac{(\chi - 0,18)}{0,18}, \quad (5.39)$$

$$C_{\theta} = 1 + 0,031 \cdot e^{-|\theta-5|}, \quad (5.40)$$

$$C_{\chi\theta} = 1 + \frac{(3 \cdot 0,18 - 2 \cdot \chi)}{0,18} \cdot 0,111 \cdot e^{-|\theta-5|}, \quad (5.41)$$

референтна вредност потољности хидрауличког скока:

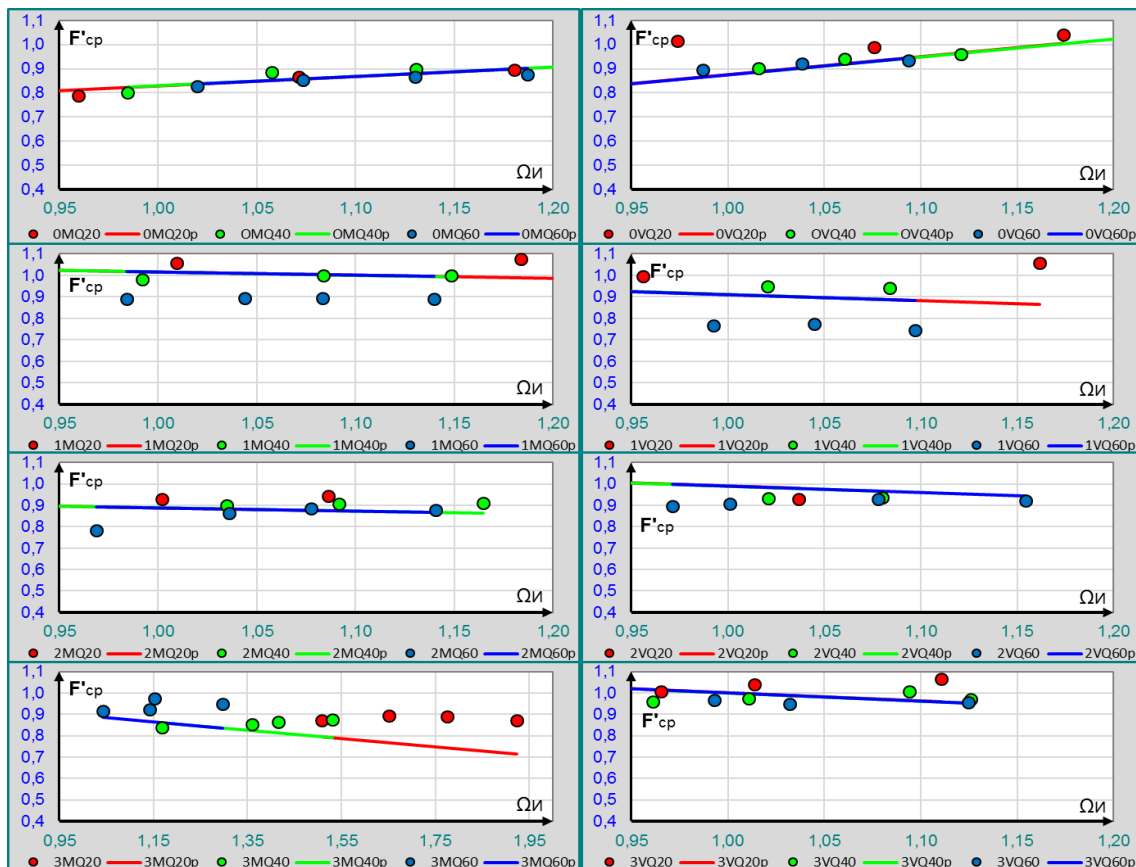
$$\Omega_{Ho} = 1,112, \quad (5.42)$$

а диференцијални коефицијенти:

$$C_{\Omega} = 0,387, \quad (5.43)$$

$$C_{\chi} = 1 + 0,929 \cdot \frac{(\chi - 0,18)}{0,18}, \quad (5.44)$$

$$C_{\theta} = 1 - 0,178 \cdot e^{-|\theta-5|} - \frac{1,749 \cdot \theta^{0,20}}{2}. \quad (5.45)$$



Слика 5.8 Верификација емпиријског израза за вертикалну силу од средњих притисака на низводној четвртини дна базена са резултатима мерења на моделима

Верификација усвојеног емпиријског израза са одговарајућим вредностима добијеним на проширеном домену параметара који су

анализирани током експериментима, приказана је на слици 5.8. Овај емпиријски израз је прихватљив на домену $\Omega_{II} = (1,0 \div 1,4)$, а изван њега даје нешто ниже вредности вертикалне силе, чиме се остаје на страни сигурности у прорачунима стабилности за плоче умирујућег базена. Такође се може уочити и да се израз (5.37) може користити и за све вредности Фрудовог броја у суженом пресеку које су коришћене у експериментима, при чему ће срачуната вертикална сила бити такође нешто мања од одговарајуће силе добијене на моделу.

5.7 Вертикална сила од пулзација на низводној четвртини дна базена

Вертикална сила од пулзација на плочу у десној (а и левој) низводној четвртини умирујућег базена, може се добити помоћу израза:

$$F'_\sigma = C_o \cdot C_{\chi o} \cdot C_{\theta o} \cdot C_{\chi \theta o} - \frac{(\Omega_{II} - \Omega_{IIo})}{\Omega_{II}^2} \cdot C_\Omega \cdot C_\theta, \quad (5.46)$$

где су базни коефицијенти: $C_o = 0,061,$ (5.47)

$$C_{\chi o} = 1 - 0,090 \cdot \frac{(\chi - 0,18)}{0,18}, \quad (5.48)$$

$$C_{\theta o} = 1 + \frac{1}{25} \cdot \left(\frac{\theta}{5}\right)^2 + 0,046 \cdot e^{\frac{|\theta - 9,704|}{90}}, \quad (5.49)$$

$$C_{\chi \theta o} = 1 + \frac{(3 \cdot 0,18 - 2 \cdot \chi)}{0,18} \cdot 0,054 \cdot e^{-|\theta - 5|}, \quad (5.50)$$

референтна вредност потоњености хидрауличког скока:

$$\Omega_{IIo} = 1,112, \quad (5.51)$$

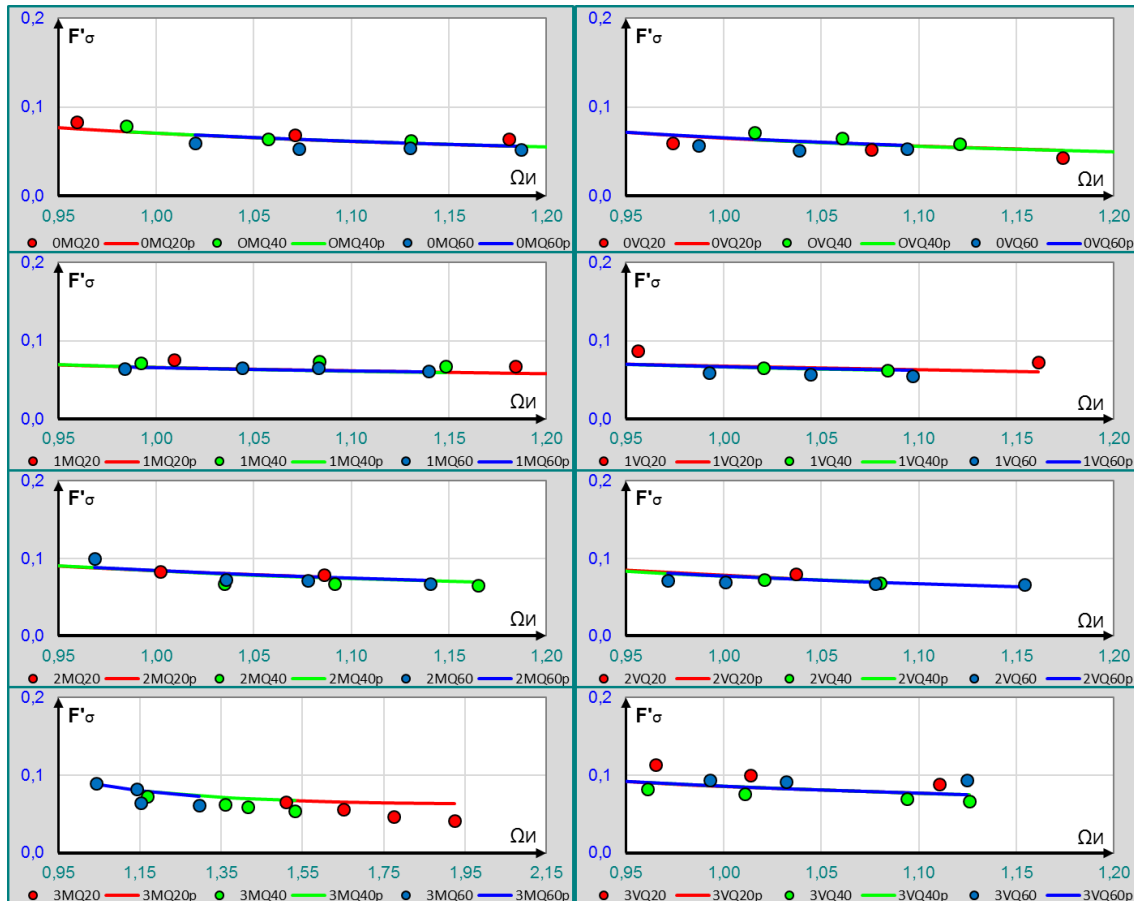
а диференцијални коефицијенти:

$$C_\Omega = 0,090, \quad (5.52)$$

$$C_\theta = 1 + 0,077 \cdot e^{-|\theta - 9,704|} - 0,48 \cdot e^{\frac{-|\theta - 5|}{0,1}}. \quad (5.53)$$

Верификација усвојеног емпиријског израза са одговарајућим вредностима добијеним на проширеном домену параметара који су анализирани током експериментима, приказана је на слици 5.9. Може се приметити да се емпиријски израз прихватљиво уклапа у резултате добијене на моделима и за параметре изван свог усвојеног домена. Сила

која се добија за $\Omega_{II} > 1,5$ је нешто већа од одговарајуће силе добијене на експерименту, али зато је то на страни сигурности. Такође се види и да се емпиријски израз може применити и при свим вредностима Фрудовог броја које су коришћене у експериментима.



Слика 5.9 Верификација емпиријског израза за вертикалну силу од пулзација на низводној четвртини дна базена са резултатима мерења на моделима

5.8 Максимална хоризонтална сила од средњих притисака у уклештењу зида умирујућег базена

Хоризонтална сила у уклештењу зида базена је величина која се користи при димензионисању овог конструктивног елемента. Са становишта пројектантске праксе, зид се димензионише на максималне утицаје који се могу јавити у неком пресеку, па је стога, уместо саме силе, значајније проценити њену максималну вредност, односно уместо регресионе функције, одредити обвојницу око усвојених података. За хоризонталну силу од средњих притисака меродавна ће бити највећа вредност у експериментима са параметрима на изабраном домену, или

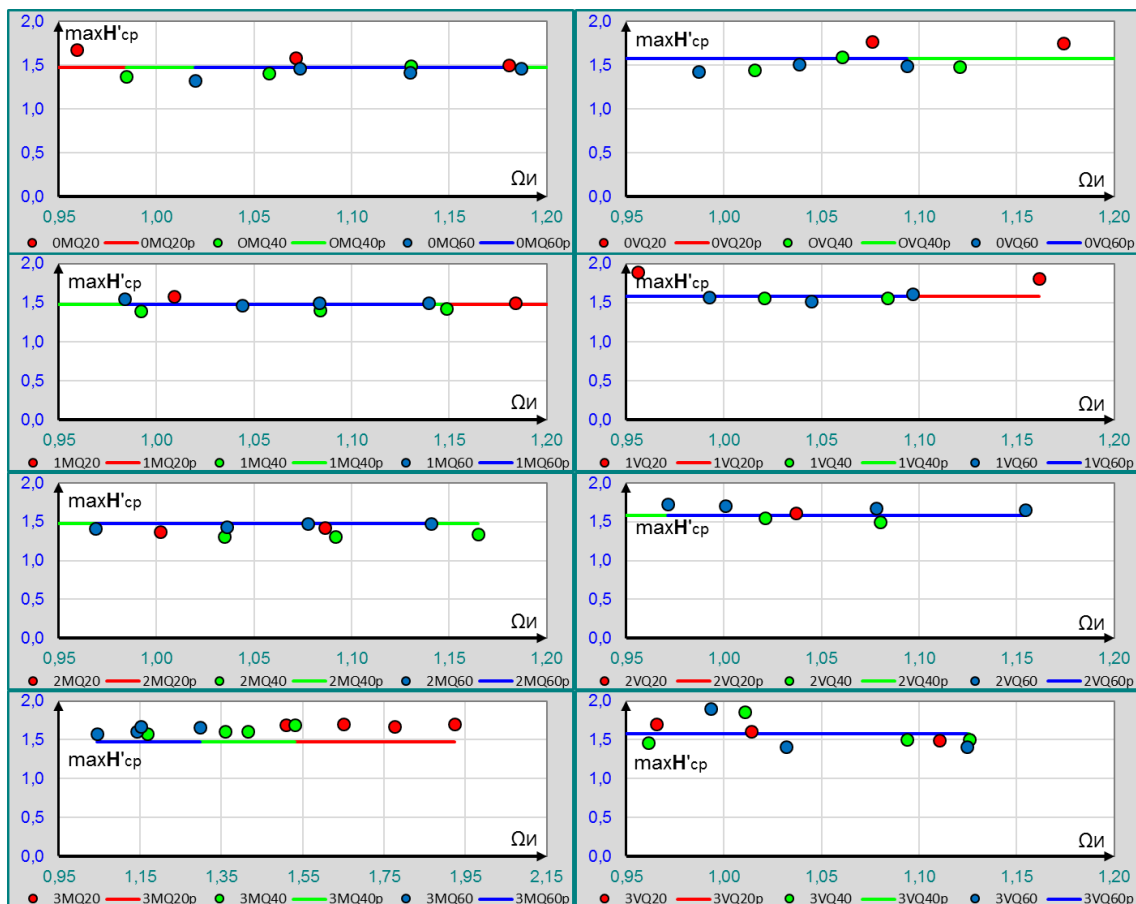
највећа вредност која одговара интервалу поузданости који ће се посматрати. Ова вредност ће се изразити у облику:

$$\max H'_{cp} = C_o \cdot C_{\chi_o}, \quad (5.54)$$

где су коефицијенти: $C_o = 1,524,$ (5.55)

$$C_{\chi_o} = 1 + 0,070 \cdot \frac{(\chi - 1,5 \cdot 0,18)}{0,18}, \quad (5.56)$$

Верификација усвојеног емпиријског израза са одговарајућим вредностима добијеним на проширеном домену параметара који су анализирани током експериментима, приказана је на слици 5.10. Може се приметити да примена обвојница ван домена $\Omega_{II} = (1,0 \div 1,4)$ и $Fr_1 > 50$, није поуздана и не препоручује се.



Слика 5.10 Верификација емпиријског израза за обвојницу хоризонталних силе од средњих притисака у уклештењу зида базена са резултатима на моделима

5.9 Максимални моменат од средњих притисака у уклештењу зида умирујућег базена

Моменат у уклештењу зида је величина која је најчешће меродавни утицај за димензионисање овог конструктивног елемента. Зид се димензионише на максималне утицаје, стога је за моменте у уклештењу корисно одредити обвојницу. За моменат од средњих притисака меродавна ће бити највећа вредност у експериментима са параметрима на изабраном домену, или највећа вредност која одговара неком интервалу поузданости.



Слика 5.11 Верификација емпиријског израза за обвојницу максималних момената од средњих притисака у уклештењу са резултатима на моделима
Вредност максималног момента у уклештењу ће бити дата у облику:

$$\max M'_{cp} = C_o \cdot C_{\chi_o} \cdot C_{\omega}, \quad (5.57)$$

где су коефицијенти: $C_o = 2,498,$ (5.58)

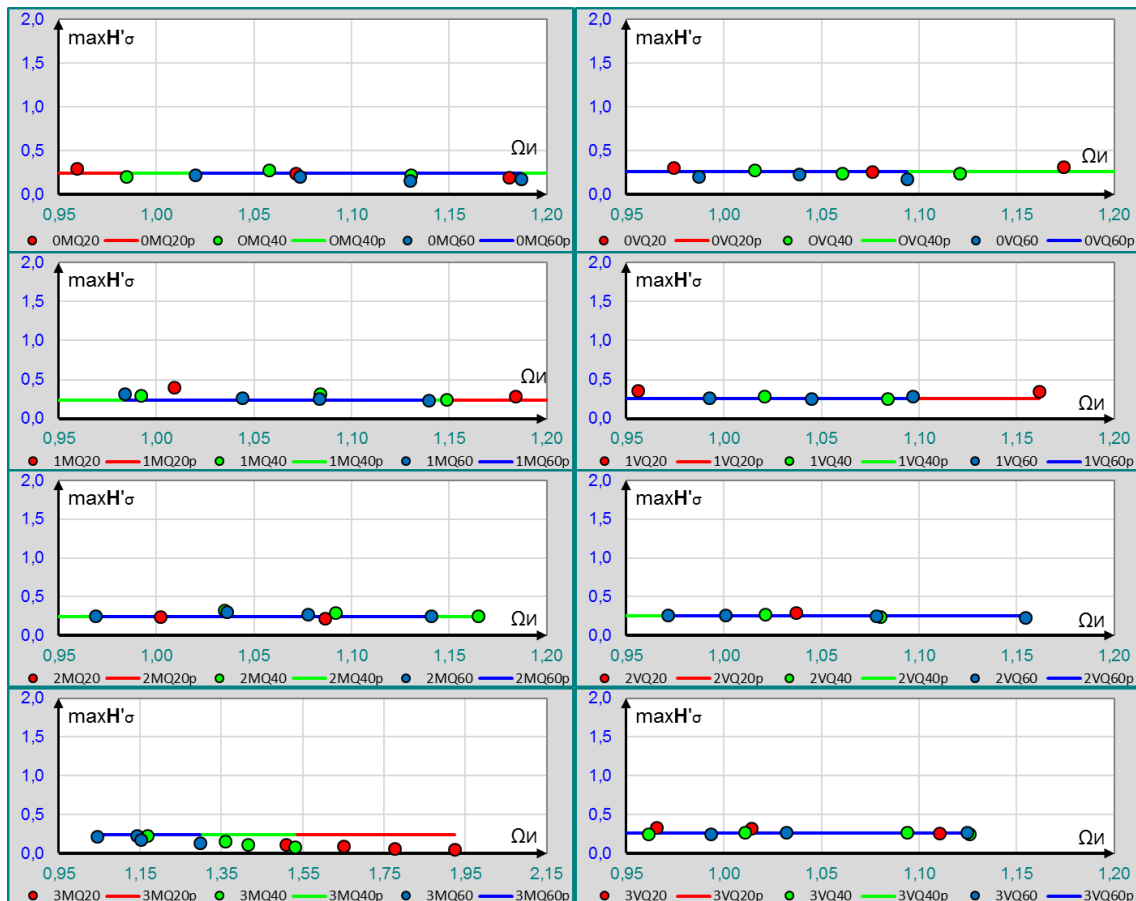
$$C_{\chi_0} = 1 + 0,115 \cdot \frac{(\chi - 0,18)}{0,18}, \quad (5.59)$$

$$C_{\theta_0} = 1 - 0,017 \cdot \frac{(\theta - 5)}{5}. \quad (5.60)$$

Верификација усвојеног емпиријског израза са одговарајућим вредностима добијеним на моделима, приказана је на слици 5.11. Може се закључити да је обвојнице ван домена $\Omega_{II} = (1,0 \div 1,4)$ и $Fr_I > 50$, непоуздана.

5.10 Максимална хоризонтална сила од пулзација у уклештењу зида умирујућег базена

Иако пулзације на зиду умирујућег базена, према резултатима спроведених истраживња, неће дати меродаване утицаје, оне ће бити предмет регресионе анализе.



Слика 5.12 Верификација емпиријског израза за хоризонталних силе од пулзација у уклештењу зида базена са резултатима на моделима

Вредност максималне хоризонталне силе од пулзација у уклештењу зида базена може да се прикаже у облику:

$$\max H'_\sigma = C_o \cdot C_{\chi_0}, \quad (5.61)$$

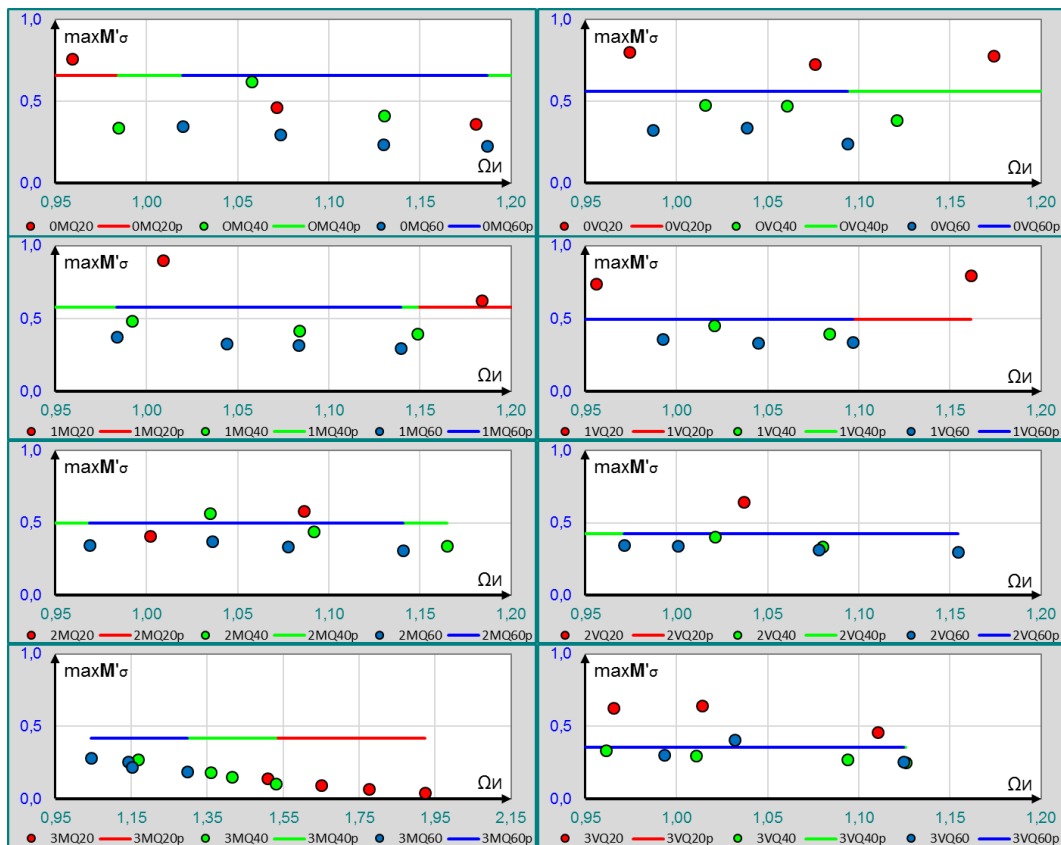
где су коефицијенти:

$$C_o = 0,248, \quad (5.62)$$

$$C_{\chi_0} = 1 + 0,066 \cdot \frac{(\chi - 1,5 \cdot 0,18)}{0,18}, \quad (5.63)$$

На слици 5.12. може се приметити да израз 5.61, ван домена $\Omega_{II} = (1,0 \div 1,4)$ и $Fr_1 > 50$, даје нешто веће вредности од добијених експериментално, што је на страни сигурности.

5.11 Максимални моменат од пулзација у уклештењу зида умирујућег базена



Слика 5.13 Верификација емпиријског израза за моменат од пулзација у уклештењу зида базена са резултатима на моделима

Вредност максималног момента од пулзација у уклештењу зида умирујућег базена може се дати у облику:

$$\max M'_{cp} = C_o \cdot C_{\chi o} \cdot C_{\theta o}, \quad (5.64)$$

где су коефицијенти: $C_o = 0,534,$ (5.65)

$$C_{\chi o} = 1 - 0,155 \cdot \frac{(\chi - 1,5 \cdot 0,18)}{0,18}, \quad (5.66)$$

$$C_{\theta o} = 1 - 0,139 \cdot \frac{(\theta - 5)}{5} \quad (5.67)$$

Верификација усвојеног емпиријског израза са одговарајућим вредностима добијеним на моделима, приказана је на слици 5.13. Може се видети да обвојница ван домена $\Omega_{II} = (1,0 \div 1,4)$ и $Fr_1 > 50$, није применљива.

5.12 Поређење резултата са модела „Бузина“ и модела ГФ

Хидраулички модел бране „Бузина“ послужио је за проверу изведених емпиријских израза за силе од средњих притисака и пулзација на узводну и низводну плочу у боку слапишта. Оба модела су имала непризматичне степенасте брзотоке, али је на моделу „Бузина“, услед нестандардне потољности, остварено сложено струјање у базену са израженим вртлозима око вертикалних оса, које не задовољава претпоставку учињену на ГФ моделу, да је ниво воде у попречним пресецима базена константан.

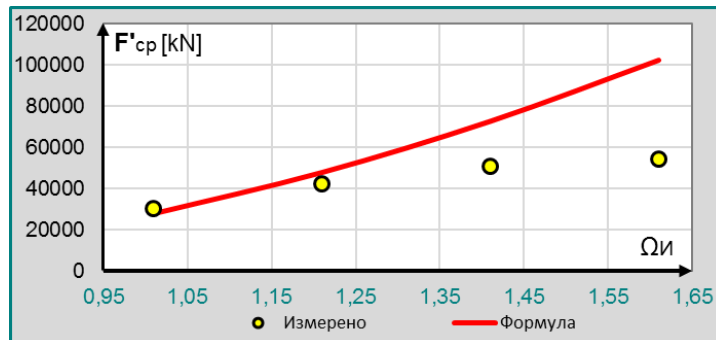
Резултати за вертикалне силе од средњих притисака на узводној-бочној четвртини слапишта приказани су у табели 5.1 а одговарајуће силе за различите потољности хидрауличног скока на слици 5.14.

Табела 5.1 Поређење вертикалне силе од средњих притиска на узводној-бочној плочи модела „Бузина“ и резултата емпиријских израза добијених на моделу ГФ

Fr_1	Ω_{II}	θ	χ	E_o	$h_{де}$	F_o	$F_{ср,уз,Буз.}$	$F_{ср,уз,еф}$	$\Delta F_{ср,уз}$
49,0400	1,0100	12	0,0332	33,1632	10,1	55550,0	30192,4	27554,6	8,74%
49,0400	1,2100	12	0,0332	33,1632	12,1	66550,0	42031,2	47542,1	13,11%
49,0400	1,4100	12	0,0332	33,1632	14,1	77550,0	50562,1	72333,4	43,06%
49,0400	1,6100	12	0,0332	33,1632	16,1	88550,0	54048,4	101928,3	46,97%

У табели 5.1 су поред параметара модела приказане вертикалне силе од средњих притисака на узводној плочи дна, на моделу „Бузина“, $F_{ср,уз,Буз.}$, и одговарајући резултат емпиријске формуле 5.20, $F_{ср,уз,еф}$, док сила F_o

означава тежину воде унутар базена када је он испуњен доњом водом, а $\Delta F_{cp,yz}$ означава релативну разлику приказану у [%].



Слика 5.14 Верификација емпиријског израза за силу од средњих притисака на узводној бочној плочи са мерењима на хидрауличком моделу „Бузина“

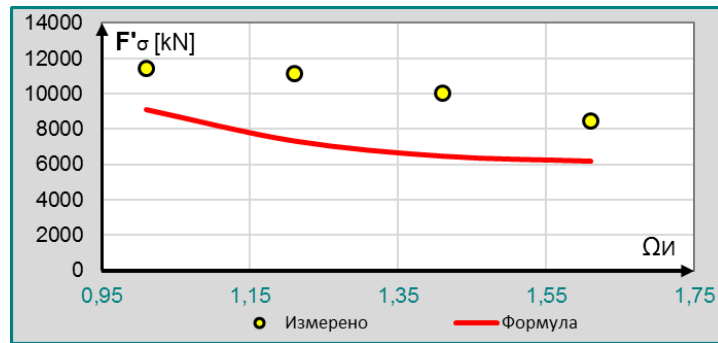
На слици 5.14 може се уочити добро слагање на домену параметара за који је емпиријски израз 5.20 одређен, али се за параметаре ван тог домена добијају знатна одступања, која нису на страни сигурности. Ова неслагања су последица депресије нивоа, настале услед сложеног струјања у базену, чиме је нарушена претпоставка о константном нивоу у попречном пресеку.

Резултати прорачуна вертикалних сила од пулзација на узводној бочној четвртини слапишта приказани су у табели 5.2, а одговарајуће силе за различите потоњености хидрауличког скока на слици 5.15.

Табела 5.2 Поређење силе од пулзација на узводној бочној плочи са модела „Бузина“ и резултата емпиријских израза добијених на моделу ГФ

Fr_1	$\Omega_{и}$	θ	χ	E_o	$h_{де}$	F_o	$F_{\sigma,yz,Буз.}$	$F_{\sigma,yz,еф}$	$\Delta F_{\sigma,yz}$
49,0400	1,0100	12	0,0332	33,1632	10,1	55550,0	11433,2	9122,2	20,21%
49,0400	1,2100	12	0,0332	33,1632	12,1	66550,0	11134,0	7347,3	34,01%
49,0400	1,4100	12	0,0332	33,1632	14,1	77550,0	10054,4	6488,1	35,47%
49,0400	1,6100	12	0,0332	33,1632	16,1	88550,0	8462,4	6203,3	36,42%

Овде се неслагања јављају и на домену параметара за које израз 5.29 дат. Ово није последица само депресије нивоа, због чега су пулзације мање пригушене, већ и чињенице да је мерење на моделу „Бузина“ третирано ову плочу као две независне плоче. То је за последицу имало значајно смањење пригушења пулзационог оптерећења. Услед тога примена емпиријског израза 5.29 на моделу „Бузина“ не даје резултате на страни сигурности.

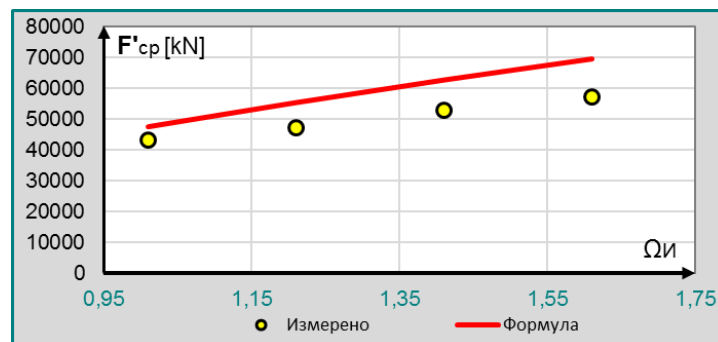


Слика 5.15 Верификација емпиријског израза за силу од пулзација на узводној бочној плочи са мерењима на хидрауличком моделу „Бузина“

Исти резултати поређења се добијају и за бочну низводну плочу умирујућег базена, што је приказано у табелама 5.3 и 5.4, као и на дијаграмима 5.16 и 5.17.

Табела 5.3 Поређење силе од средњих притисака на низводној бочној плочи са модела „Бузина“ и резултата емпиријских израза добијених на моделу ГФ

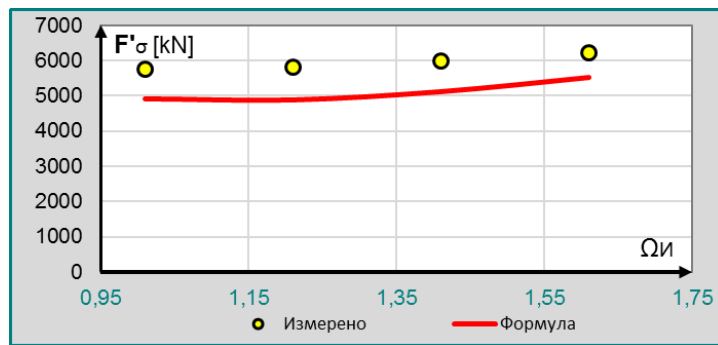
Fr_1	$\Omega И$	θ	χ	E_o	$h_{де}$	F_o	$F_{ср,низ,Буз.}$	$F_{ср,низ,еф}$	$\Delta F_{ср,уз}$
49,0400	1,0100	12	0,0332	33,1632	10,1	55550,0	43262,7	47390,0	9,54%
49,0400	1,2100	12	0,0332	33,1632	12,1	66550,0	47118,5	55250,6	17,26%
49,0400	1,4100	12	0,0332	33,1632	14,1	77550,0	52649,2	62607,6	18,91%
49,0400	1,6100	12	0,0332	33,1632	16,1	88550,0	57048,9	69460,8	17,87%



Слика 5.16 Верификација емпиријског израза за силу од средњих притисака на низводној бочној плочи са мерењима на хидрауличком моделу „Бузина“

Табела 5.4 Поређење силе од пулзација на низводној бочној плочи са модела „Бузина“ и резултата емпиријских израза добијених на моделу ГФ

Fr_1	$\Omega И$	θ	χ	E_o	$h_{де}$	F_o	$F_{\sigma,низ,Буз.}$	$F_{\sigma,низ,еф}$	$\Delta F_{\sigma,уз}$
49,0400	1,0100	12	0,0332	33,1632	10,1	55550,0	5755,3	4924,1	14,44%
49,0400	1,2100	12	0,0332	33,1632	12,1	66550,0	5807,3	4893,7	15,73%
49,0400	1,4100	12	0,0332	33,1632	14,1	77550,0	5979,8	5120,5	14,37%
49,0400	1,6100	12	0,0332	33,1632	16,1	88550,0	6233,5	5508,4	13,16%



Слика 5.17 Верификација емпиријског израза за силу од пулзација на низводној бочној плочи са мерењима на хидрауличком моделу „Бузина“

На основу ових резултата може се закључити да предложени емпиријски изрази за низводну бочну плочу имају боља слагања, али нису применљиви у свим случајевима због различите поделе дна умирујућег базена на плоче.

6 ЗАКЉУЧЦИ

Предмет истраживања ове дисертације је умирујући базен иза непризматичног степенастог брзотока. Најважнији циљ је одређивање хидродинамичких утицаја на конструктивне елементе базена, а процењена је и могућност настанка вибрација и кавитације. Истраживање је извршено на наменски припремљеној инсталацији у лабораторији Грађевинског факултета у Београду и на хидрауличком моделу бране „Бузина“. На основу резултата приказаних у овој дисертацији могу се извести следећи закључци:

1. На расподелу хидродинамичког оптерећења и интензитет утицаја на конструктивне елементе умирујућег базена највећи допринос дају сужење брзотока, висина степеника на брзотоку, потопљеност хидрауличког скока и Фрудов број у суженом пресеку. Процену вредности хидродинамичких утицаја могуће је извести и без познавања Фрудовог броја. У том случају тачност прорачуна је до 10% и важи за потопљености хидрауличког скока у интервалу од $\Omega_{и} = 1,0 \div 1,3$.
2. Средњи притисци на дно умирујућег базена се могу раздвојити на оне који су последица тежине воде у базену (хидростатички притисци) и оне који настају због промене правца тока у вертикалној равни (скретни притисци). Хидростатички притисци зависе од дубине воде, па њихов интензитет прати линију нивоа дуж базена. Утицаји од скретних притисака су локалног карактера и јављају се само на почетку умирујућег базена. Скретни притисци се значајно смањују са повећањем висине степеника на брзотоку.
3. Пулзације притиска у умирујућем базену су најизраженије на почетку хидрауличког скока. Повећање дубине воде у базену значајно пригушује пулзације. Пулзације иза непризматичног брзотока постају интензивније по боковима, а пригушеније у близини осе базена. Ова попречна прерасподела пулзација је интензивнија при већим сужењима брзотока. Силе од пулзација на конструктивне елементе базена се смањују са повећањем површине елемената, што је последица неједновремености

деловања пулзационог оптерећења, како по интензитету, тако и по смеру.

4. Највећи утицаји у уклештењу зида од средњих притисака се јављају на низводном крају умирујућег базена. Утицаји од пулзација у уклештењу зида су највећи на почетку хидрауличког скока. Хидродинамички утицаји на зидове базена постоје и изнад линије нивоа.
5. Ако су коефицијенти потопљености хидрауличког скока већи од јединице ($\Omega_{и} > 1,0$) нису уочене појаве потпритисака, па се може сматрати да нема услова за настанак кавитације.
6. Доминантне фреквенце утицаја уочене су само код непотопљеног хидрауличког скока ($\Omega_{и} < 1,0$), па у реалним условима коришћења објекта не постоје ни услови за појаву вибрација.
7. На основу спроведених мерења и анализа резултата, у дисертацији су развијени, калибрисани и верификовани оригинални регресиони изрази за процену хидродинамичких утицаја у умирујућим базенима непризматичних степенстих брзотока. На тај начин, по први пут су дефинисани изрази за утицаје (силе и моменти), услед средњих притисака и пулзација притисака за дно и зидове базена иза степенстих брзотока.
8. Предложене регресионе формуле за утицаје на зидове могу се користити и за базене глатких брзотока (у домену испитиваних параметара), с обзиром да у доступној литератури не постоје одговарајући изрази.
9. Регресионе формуле развијене у овој дисертацији омогућавају ефикасно димензионисање умирујућих базена иза степенстих брзотока, поготово у раним фазама пројектовања, пре израде физичких хидрауличких модела.

Ова дисертација може да послужи као основа за даља истраживања хидродинамичких утицаја на конструктивне елементе умирујућих базена. При томе треба имати у виду препоруке о избору обима и начина узорковања података и примену нове методе директне статистичке

анализе низова података, добијених обрадом мерних података. Даља истраживања могу да се крећу у два правца:

1. Одређивање утицаја узимањем у обзир промене нивоа у попречним пресецима и промене густине воде због увлачења ваздуха. Ово би захтевало набавку одговарајуће мерне опреме, док би се експерименти могли вршити на постојећој инсталацији.
2. Проширењем поља истраживања на утицај нагиба брзотока, ширине умирујућег базена и размере модела. Такође, могу се разматрати непризматични умирујући базени, као и базени са зубима и блоковима. Ово би захтевало изградњу нових модела, док би се могла искористити постојећа мерна опрема. Квалитет истраживања могуће је значајно унапредити осавремењавањем мерне опрема, а нарочито повећањем броја мерних уређаја.

7 ЛИТЕРАТУРА

- [1] Bowers C. E., Charles E., Tsai, Frank Y., Kuha, Roy M., *Hydraulic Studies of The Spillway of The Karnafuli Hydroelectric Project East Pakistan*, St. Anthony Falls Laboratory, St. Anthony, **1964**.
- [2] Hajdin G., *O praktičnom značaju statističke analize pulzacija pritiska vode na konture hidrotehničkih konstrukcija*, Saopštenja sa VIII kongresa jugoslovenskog komiteta za visoke brane, Ohrid, **1970**.
- [3] Hajdin G, Gencil Ž., *Pulzacije pritiska na dno bučnice za umirenje izlazećeg mlaza iz tunela*, XI Jugoslovenski kongres racionalne i primenjene mehanike, Baško Polje, **1972**.
- [4] Hajdin G, Ivetić M., *Pritisci i njihove fluktuacije na dno bazena u koji voda pada*, XV jugoslovenski kongres teorijske i primenjene mehanike, Kupari, **1981**
- [5] Hajdin G, Arandelović D., *Verovatna sila pritiska na čvrstu graničnu površinu fluidne struje određena na osnovu izmerenih i statistički obrađenih pritisaka u većem broju tačaka površine*, XV jugoslovenski kongres teorijske i primenjene mehanike, Kupari, **1981**.
- [6] Hajdin G., *Prilozi za procenu fluktuacionog opterećenja na granične površine fluidne struje - na osnovu izmerenih pritisaka u nekoliko tačaka površine* VIII savetovanje jugoslovenskog društva za hidraulička istraživanja, Portorož, **1982**.
- [7] Špoljarić A, Hajdin G., *Dinamički uzgn na dno ispod hidrauličkog skoka*, XVII jugoslovenski kongres teorijske i primenjene mehanike, Bečići, **1984**.
- [8] Hajdin G., Pokrajac D., Stevanović S., *Dinamički uzgn na dno ispod potopljenog hidrauličkog skoka*, XVII jugoslovenski kongres teorijske i primenjene mehanike, Bečići, **1984**.
- [9] Hajdin G., Stevanović S., *Dinamički uzgn na dno ispod potopljenog hidrauličkog skoka*, XVIII jugoslovenski kongres teorijske i primenjene mehanike, Zadar, **1986**
- [10] Bowers C. E., Toso J., Karnafuli Project, *Model Studies of Spillway Damage*, Journal of Hydraulic Engineering 114(5), **1988**.

-
- [11] Khatsuria R. M., *Hydraulics of spillways and energy dissipators*, Georgia Institute of Technology Atlanta, Georgia, **2005**.
- [12] Савић Љ., *Увод у хидротехничке грађевине*, Грађевински факултет Универзитета у Београду, Београд, **2009**.
- [13] Savic Lj., Kuzmanovic V., Milovanovic B., Ski jump design, ICE - Water Management, Issue WM10, Vol.163 (2010), p.p. 523-527, DOI No. 10.1680/wama.900052, **2010**.
- [14] Starinac D., *Hidraulička modelska ispitivava brane Buzina*, institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi" A.D. zavod za hidruliku, Београд, **2013**.
- [15] Hager W., *Energy Dissipators and Hydraulic Jump*, Springer-Science-Business Media, Zürich, **2013**.
- [16] Дамњановић М., Миловановић Б., Војт П., Капор Р., Кузмановић В., Савић Љ., *Утицај доње воде на динамичке притиске у умирујућем базену*, Саопштење са међународног скупа, Суботица, **2014**.
- [17] Thandaveswara B. S., *Course of Hydraulics*, Indian Institute of Technology Madras, Madras, **2014**.
- [18] Evans A. L., *Velocity distributions and wall pressures in a scale model gated box culvert control structure*, University of Nebraska - Lincoln, **2015**.
- [19] Коларевић М., *Бурно течење у кривинама евакуационих објеката докторска дисертација*, Грађевински факултет Универзитета у Београду, Београд, **2015**.
- [20] Зиндовић Б., *Струјање у степенастом брзотоку са постепеним смањењем ширине корита докторска дисертација*, Грађевински факултет Универзитета у Београду, Београд, **2017**.

8 БИОГРАФИЈА АУТОРА

Бојан (Драгољуб) Миловановић је рођен је 2. 6. 1970. године у Параћину. По националности је Србин. Основну и средњу школу математичко-техничког смера завршио је са одличним успехом. За постигнуте резултате награђен је дипломом "Никола Тесла".

Студије на Грађевинском факултету у Београду започео је школске 1994/95 године. Дипломирао је фебруара 2000. године на Одсеку за конструкције, са просечном оценом у току студија 8,69 и оценом 10 за дипломски рад на тему: Бетонска Гравитациона брана "Градац" -статички и динамички прорачун.

Одбранио је магистарску тезу на Грађевинском факултету у Београду 13. 7. 2011. године под насловом "Напони затезања на узводном зубу гравитационе бетонске бране".

Од 1. 3. 2000. године запослен је на Грађевинском факултету као инжењер сарадник. Дана 12. 6. 2000. године изабран је за асистента приправника, а 7. 3. 2013. за асистента на предметима Хидротехничке конструкције и Хидротехничке грађевине.

Кандидат поседује знање француског језика.

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Име и презиме аутора Бојан Миловановић

Број индекса (по старом)

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

Потпис аутора

У Београду, 6. 6. 2018

ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ШТАМПАНЕ И ЕЛЕКТРОНСКЕ ВЕРЗИЈЕ ДОКТОРСКОГ РАДА

Име и презиме аутора Бојан Миловановић

Број индекса (по старом)

Студијски програм Грађевинарство

Наслов рада Хидродинамички утицаји на евакуационе објекте хидротехничких грађевина

Ментор професор Др Владан Кузмановић дипл. грађ. инж.

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањена у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис аутора

У Београду, 6. 6. 2018

ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Хидродинамички утицаји на евакуационе објекте хидротехничких грађевина

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)

2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)

3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)

5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)

6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.
Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

Потпис аутора

У Београду, 6.6.2018.

1. **Ауторство.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.