

eman ta zabal zazu



Universidad del País Vasco Euskal Herriko Unibertsitatea

Komunikazioen Ingeniaritza Saila
Bilboko Ingeniarien Goi Eskola Teknikoa

DOKTOREGO TESIA

QoE-aren optimizaziorako indize erregelen proposamenak sare baliabideen esleipenerako planifikazioan

Egilea:

Janire Taboada Puente

Zuzendaria:

Fidel Liberal Malaina

Bilbo, 2013ko urria

Xabi eta Ainiri

Eskerrak

Ez dut sekulan ahaztuko nire amamak esandako hitzak: “Ez dago lortu ezin duzun erronkarik zuretzat”. Arrazoia zuen, bidea errazagoa edo zailagoa izanda, azkenean gogo eta esfortzuekin nahi dudan guztia (edo ia guztia) lortu dut bizitza honetan. Pozik nago.

Hala ere, lan honen garapena zuek gabe ezinezkoa izango litzateke. Modu honetan, nire bizitzaren parte zareten guztiei eskerrak eman nahi dizkizuet. Momentua heldu da. Zuetariko bakoitzari adierazi nahi dizuedan guztia esateko orrialde eta egun asko beharko nituzke, baina beti bezala ez dut denborarik. Dena den, sentitzen dudana adieraztea espero dut.

Lehenik eta behin, NQaS taldeko kide guztiei eta K-ri emandako babes eskertu nahi diet. Fidel, eskerrik asko aukera hau emateagatik. Eva, nire “alma gemela”, mila esker urte hauetan nire benetako ama izateagatik. JoF, asko ikasi dut zurekin. Bego, beti positibotasuna transmititzen. AFV-ri, hain autentikoa izateagatik. AI, NQaS taldean sartzeko bultzatzailea izan zinen, bi alaba miresgarri dituzu. Urtzi eta Peterri, maisu onak edozein tokitan.

Bestalde, arlo desberdinetako lagunei eskerrak eman nahi dizkiet. Badakit agertzten eta desagertzten naizela. Haurtzaroko lagunei, Leticia, Dori, Irati eta María, berdin da zenbat denbora igarotzen den ikusi edota hitz egin gabe, elkarrekin gaudenean umetan bezala sentitzen naiz. Kalime taldeko kide guztiei. Itsaso, mila esker momentu txarretan nirekin egoteagatik. Ariñeri, zure laguntzagatik beste gauzen artean. Arrate eta Leireri, poztasuna transmititzeagatik. Nire Angulito, berezia zara niretzat. Patriciari, Poza, KPo eta “los pozanos” nire bizitzan presente daudela eragiten didazulako, eta batez ere, nigatik arduratzeagatik. Gimnasiako benetako adiskideei, gimnasiari dedikatutako denborak merezi duela eragiten didazuelako. Elisa eta Iratxeri, elkarrekin pasatutako momentu adieraezinengatik. Bego, ikasi dudan guztia zuri zor dizut. Esti, zure laguntzagatik eta zaren bezala izateagatik. Su eta Tatiri, nire aurkikuntza berria, bi pertsona miragarri. María eta Maitaneri, nire neska faboritoak, zuekin lan egitea plazer bat izan da. Karrerako lagunei, Mikel, Asier eta Erlantz, eskerrik asko zuen konfiantza emateagatik. Igorri, bere gustu gastronomikoagatik.

Unerik gogorrena heldu da. Amari, edozein umek nahi izango lukeen haurtzaroa

emateagatik. Aburi, familiako jakinduria eta zentzutasuna, zurekin denbora gehiago egotea gustatuko litzaidake. Barakaldokoak, gure benetako familia, Mari, César, Unai eta MV, mila esker gugatik egiten duzuen guztiagatik. Arantxari, bizitza era sinplean aurre egiteko moduagatik. Aitari, zugandik nuen konfiantza itzultzeagatik eta nahi dudanerako hor zaudela dakidalako. Gure artean ez dauden bi amamei eta osaba Mitxeli, inoiz ez zaituztet ahaztuko, nire haurtzaroan ezinbestekoak izan zarete. Xabiren amari ere, egon daitekeen amaginarreba onena izateagatik.

Nire bizitzako “altxorra” eta “ardura” nagusia nire ahizpa Ainara dela esan dezaket. Aini, badakizu hemen nauzula nahi duzunerako. Tesi honen bigarren sufritzailea izan zara; lan honekin bukatutakoan, denbora gehiago izango dut zuretzat. Laster zure ikasketak bukatuko dituzu, eta etorkizunean zortea izango duzula ziur nago.

Eta bukatzeko, eskerrik beroenak Xabiri, letra larriz. Tesiaren sufritzaile nagusia izan zara ez bairik gabe. Amaitu da Xabi, bukatu da unerik txarretan ere elkarrekin egotea utzi ez gaituen lan hau. Hemendik aurrera pozago egongo naizela zin egiten dizut. Unerik gogorretan beti egon zara nirekin, eta sekulan ezin izango dizut nigatik egin duzun guztia eskertu. Maite zaitut, bizitzeko geratzen zaiguna zurekin igarotzea espero dut. Gora Big Mouth!

Laburpena

Sare hornitzaileek gaur egun aurre egin behar dioten erronka nagusietariko bat erabiltzaileen trafiko fluxuen artean sare baliabideen partekatzerako kudeaketa da. Sare baliabideen esleipenerako planifikazio estrategia tradizionalak zerbitzuaren kalitate parametro objektiboetara orientatzen dira. Hala ere, sare baliabideen esleipen horretan kalitate subjektiboaren maximizatorako planifikazioaren garrantziaren eta beharraren aurrean, tesi lan honetan erabiltzaileek hautemandako kalitatearen maximizazioa helburutzat duen sare baliabideen planifikaziorako scheduling algoritmoen lorpenean sakondu da.

Horrez gain, urteetan zehar scheduling optimizazio problema horien ebazpenaren sinplifikaziorako trafikoaren modelaketarako fluxu-tamaina banaketa esponentzialak kontsideratu badira ere, lan honetan errealitatea hobeto islatzen duten tamaina banaketak kontenplatu dira.

Era honetan, trafiko fluxuen planifikaziorako optimizazio arloan aurkitutako ga-beziei aurre egiteko, tesi lan honetan sare baliabideen esleipen dinamiko eta estokastikoaren hiru problema aztertzen dira: (i) Bataz besteko kalitate subjektiboaren maximizazioa kanal kapazitatea konstantea denean, (ii) Bataz besteko kalitate subjektiboaren maximizazioa denboran aldakorra den kapazitatea duen kanalaren kasuan eta (iii) Tamaina banaketa orokorrerako bataz besteko atzerapenaren minimizazioa denboran aldakorra den kapazitatea duen kanalaren kasuan. Problema horien soluzio optimoa analitikoki zein konputazionalki eskuratzea bideragarria ez denez, sinpleak, tratagarriak eta inplementagarriak diren eta errendimendu ona erakusten duten lehentasunean oinarritutako scheduling diziplina heuristikoak diseinatzeari ekin zaio.

Horretarako, ikerketa hau matematika arloan ekarpen handia duten erabakitze prozesu markoviarren markoan eta scheduling indize erregela motako soluzioak eskuratzeko Gittins zein Whittle metodoetan zentratu da. Modu honetan, lehenik eta behin, aurreko scheduling problemak erabakitze prozesu markoviarren plataforman modelatu dira. Ondoren, eredu analitiko horien soluzio optimoaren lorpena ezinezkoa izanik, horien ebazpenerako Gittins-en edota Whittle-n oinarritutako metodologiak erabilia, adierazpen itxia duten planifikazio indize erregelak proposatu dira.

Analizatutako hiru problemen indize erregelen ondorioztatzearen ekarpenaz apar-

te, erabakitze prozesu markoviar batean oinarritutako sare baliabideen esleipenean erabiltzailearen pertzepzioaren maximizaziorako scheduling optimizazio problemarako hautemandako kalitatea kontuan hartzen duen eredu analitikoaren proposamena azpimarratzekoa da. Eredu matematiko horren modelaketan kalitate subjektiboa sartzeko modua eredu horretatik abiatuz erabiltzailearen pertzepzioaren maximizaziorako problema ezberdinetarako indize erregela egokiak eskuratzeko oinarria da.

Bukatzeko, proposatutako scheduling diziplinen funtzionamendua balioztatzeko planifikazio proposamen horien errendimenduaren azterketa egin da. Horrela, planifikazio estrategia berri horiek barietate ugariko agertokietan errendimendu egokia erakusten dutela egiaztatu da, 4G sare baten kasuan barne.

Beraz, lan honetan lortutako emaitzak gaur egungo eta etorkizuneko sareetan scheduling algoritmoak garatzeko oinarri matematiko garrantzitsua dira.

Abstract

One of the fundamental challenges that network providers nowadays face is the management for sharing network resources among users' traffic flows. Traditional scheduling strategies for resource allocation are oriented to objective quality parameters. Nevertheless, considering the importance and the necessity of network resource allocation for maximizing subjective quality, this thesis goes into detail about scheduling algorithms aimed at maximizing users' perception of quality.

For many years, exponential flow size distributions have been considered for traffic modelling in order to simplify the resolution of those scheduling optimization problems. As a step forward, in this work size distributions that better capture the real-world patterns are taken into account.

Thus, to overcome the lacks found in the field of traffic flow scheduling optimization, in this thesis three stochastic and dynamic resource allocation problems are analyzed: (i) Subjective quality maximization when channel capacity is constant, (ii) Subjective quality maximization in channels with time-varying capacity, (iii) Mean delay minimization for general size distributions in channels with time-varying capacity. Since these problems are analytically and computationally unfeasible for finding an optimal solution, we focus on designing simple, tractable and implementable well-performing heuristic priority scheduling rules.

For this aim, this research is focused on the Markovian decision processes framework and on Gittins and Whittle methods to obtain scheduling index rule solutions, which have a great contribution in the mathematics area. In this way, first of all, the above scheduling problems are modelled in the framework of Markovian decision processes. Then, being the obtaining of the optimal solution of these analytic models unachievable, using methodologies based on Gittins or/and Whittle approaches for their resolution, scheduling index rules with closed-form expression have been proposed.

Apart from the contribution of deriving index rules for the three analyzed problems, the proposal of an analytic model that takes into account perceived quality is remarkable. The proposed model is based on a Markovian decision process and designed for the network resource allocation scheduling problem aimed at maximizing user's perception. The way of introducing subjective quality in the modelling of that mathemati-

cal model is the basis for obtaining suitable index rules for different user's perception maximization problems.

Finally, the performance of the proposed scheduling disciplines is analyzed in order to validate their proper operation. In that way, it is verified that these new scheduling strategies show suitable performance in a wide range of scenarios, including the case of a 4G network.

Therefore, the results of this thesis are presented as a relevant mathematical basis for developing scheduling algorithms in current and future networks.

Gaien Aurkibidea

Irudien Zerrenda	xiii
Taulen Zerrenda	xvii
1 Sarrera	1
1.1 Tesiaren aurrekariak	2
1.2 Helburuak	5
1.3 Dokumentuaren egitura	6
2 Erabilitako marko analitikoari sarrera: MDP, eta Gittins eta Whittle indize erregelak	7
2.1 MDP	8
2.2 Indize erregelak	10
2.2.1 Gittins indizea	10
2.2.2 Whittle indizea	11
3 QoE-aren maximizatorako eredu analitikoaren proposamena	15
3.1 Problemaren deskribapena	16
3.2 QoE-aware MDP ereduaren proposamena	20
3.2.1 Akzio-espazioaren definizioa	21
3.2.2 Egoera-espazioaren definizioa	22
3.2.3 Egoera trantsizio-probabilitateen definizioa	23
3.2.4 Sarien definizioa	24
3.3 Soluzio optimoaren analisia	25
3.4 Ondorioak	28
4 QoE-aren maximizatorako indize erregelaren proposamena kanal konstantean	29
4.1 Gittins-en oinarritutako QoE-aware indize erregelaren proposamena	30
4.2 Whittle-n oinarritutako QoE-aware indize erregelaren proposamena	34
4.3 Ondorioak	37

5	QoE-aren maximizaziorako indize erregelaren proposamena denboran aldatzen den kanalean	39
5.1	Atzerapenaren minimizaziorako proposamena	41
5.1.1	Problemaren deskribapena	42
5.1.2	MDP formulazioa	44
5.1.2.1	MDP eredia	44
5.1.2.2	Optimizazio problema	46
5.1.3	Whittle indizean oinarritutako soluzioa	46
5.1.3.1	Whittle indizearen propietateen azterketa	47
5.1.3.2	Whittle indizearen adierazpena	51
5.1.3.2.1	Adierazpen orokorra	53
5.1.3.2.2	DGHR kasurako partikularizazioa	55
5.1.3.2.3	Whittle indizearen hurbilketa oinarritutako indize erregelaren proposamena	58
5.2	QoE-aware indize erregelaren proposamena	61
5.2.1	Problemaren deskribapena	61
5.2.2	QoE-aware MDP ereduaren hedapena	62
5.2.3	Whittle-n oinarritutako QoE-aware indize erregelaren proposamena	65
5.2.3.1	Whittle indize hurbilduaren proposamena	70
5.3	Ondorioak	73
6	Balioztatzea	75
6.1	Balioztatze metodologia	77
6.1.1	Azterketarako errendimendu metrikak	77
6.1.2	Planifikatzailea eta erabilitako scheduling algoritmoak	78
6.1.3	Trafikoaren ezaugarriak	79
6.1.4	Sarearen ezaugarriak	80
6.1.5	Erabiltzailearen QoE ezaugarriak	80
6.1.6	Simulazioen ezaugarriak	81
6.1.7	Agertokien deskribapena	81
6.1.7.1	Kanal konstanteko kasurako errendimenduaren analisiarako agertokien aukeraketa eta deskribapena	83
6.1.7.2	Kanal aldakorreko kasurako errendimenduaren analisiarako agertokien aukeraketa eta deskribapena	85
6.1.7.3	Klase anitzeko errendimenduaren analisisarako agertokien aukeraketa eta deskribapena	87
6.2	Errendimenduaren analisisia kanal konstantean	95
6.2.1	Tamaina mota desberdinetarako analisisia	95

6.2.1.1	Bataz besteko QoE analisia	95
6.2.1.2	Bataz besteko atzerapenaren analisia	96
6.2.1.3	Ekitatearen analisia	96
6.2.1.4	Oinarrizko funtzionamenduaren azterketa	97
6.2.2	QoE drastikoaren kasuaren azterketa	103
6.2.3	Beste kanal kapazitate baterako azterketa	105
6.3	Errendimenduaren analisia kanal aldakorrean	106
6.3.1	Bi kanalen kasurako analisia	107
6.3.1.1	Oinarrizko kasuaren azterketa	107
6.3.1.1.1	Bataz besteko QoE analisia	107
6.3.1.1.2	Bataz besteko atzerapenaren analisia	108
6.3.1.1.3	Ekitatearen analisia	109
6.3.1.1.4	Oinarrizko funtzionamenduaren azterketa	111
6.3.1.2	Kanal probabilitate ezberdinetarako azterketa	113
6.3.1.3	Beste kanal kapazitateetarako azterketa	115
6.3.1.4	QoE drastikoaren kasuaren azterketa	116
6.3.1.5	Beste bataz besteko tamainarako azterketa	117
6.3.1.6	ON/OFF kasuaren azterketa	118
6.3.2	N kanalen kasurako analisia	119
6.3.2.1	Kanal probabilitateak kanal kapazitateen ordena gora- korrekoak direnen kasurako azterketa: kasu baikorra	120
6.3.2.2	Kanal probabilitateak kanal kapazitateen ordena behe- rakorrekoak direnen kasurako azterketa: kasu ezkorra	120
6.4	Errendimenduaren analisia klase anitzeko inguruneetan	122
6.4.1	Kanal konstante kasurako azterketa	122
6.4.1.1	Tamainan desberdinak diren klaseen kasurako azterketa	123
6.4.1.2	Kalitatearen hautematean desberdinak diren klaseen ka- surako azterketa	124
6.4.1.3	Kanal kapazitatean desberdinak diren klaseen kasurako azterketa: Wireless sare baterako aplikazioa	126
6.4.2	Kanal aldakor kasurako azterketa	128
6.4.2.1	Bi kanalen kasurako azterketa	128
6.4.2.1.1	Kanal probabilitateetan desberdinak diren kla- seen kasurako azterketa	130
6.4.2.1.2	Kanal kapazitateetan desberdinak diren klaseen kasurako azterketa	133

6.4.2.1.3	Kalitatearen hautematean eta kostuan desberdinak diren klaseen kasurako azterketa	136
6.4.2.1.4	Tamainan desberdinak diren klaseen kasurako azterketa	138
6.4.2.2	N kanalen kasurako azterketa	140
6.4.2.2.1	Kanal probabilitateetan ezberdinak diren klaseen kasurako azterketa: kasu baikorra eta ez-korraren arteko nahasketa	141
6.4.2.2.2	Wireless sare erreal baterako azterketa: kanal korrelatuaren kasua	145
6.5	Ondorioak	148
7	Ondorioak	153
7.1	Burututako lana	154
7.1.1	QoE-aren maximizaziorako eredu analitikoaren proposamena . . .	154
7.1.2	QoE-aren maximizaziorako indize erregelaren proposamena kanal konstantean	154
7.1.3	QoE-aren maximizaziorako indize erregelaren proposamena denboran aldakorra den kanalean	156
7.1.4	Fluxu tamaina banaketa orokorrerako atzerapenaren minimizaziorako indize erregelaren proposamena denboran aldakorra den kanalean	157
7.1.5	Proposatutako indize erregelen balioztatzea	158
7.2	Tesiaren ekarpenak	160
7.2.1	Proposatutako QoE-aware eredu analitikoa	160
7.2.2	Proposatutako GWM scheduling indize erregela	160
7.2.3	Proposatutako ASPIM scheduling indize erregela	161
7.2.4	Proposatutako Whittle eta ASPI scheduling indize erregelak	162
7.2.5	Proposatutako indize erregelen balioztatzea	162
7.3	Kontribuzioak	164
7.3.1	Argitalpenak, eta artikuluak eta aurkezpenak kongresuetan	164
7.3.1.1	Argitalpenak	164
7.3.1.2	Artikuluak eta aurkezpenak kongresuetan	166
7.3.2	Ikerketa kontratuak eta proiektuak	167
7.3.2.1	Ikerketa kontratuak	167
7.3.2.2	Proiektuak	168
7.4	Etorkizuneko lerroak	169

Bibliografia	171
A Frogapenak	179
A.1 1 Proposizioaren frogapena	179
A.2 1 Teoremaren frogapena	187
A.3 3 Proposizioaren frogapena	190
A.4 4 Proposizioaren frogapena	191
Glosategia	195

Irudien Zerrenda

2.1	MDP baten elementuen aurkezpena.	8
3.1	MOS vs. atzerapen adibidea.	18
3.2	Erabiltzaile baten QoE-aware egoera diagrama.	22
4.1	GM-en efizientzia funtzioa vs. τ	32
5.1	Erabiltzaile baten channel-aware MDP egoera diagramaren zatia.	45
5.2	Bi kanalen kasurako Whittle indize normalizatuak bataz besteko tamaina desberdinentzat. $\alpha = 1.5$ duen Pareto banaketa erabiltzen da, $q_2 = 0.5$, $r_1 = 8.4$ Kb eta $r_2 = 16.8$ Kb izanik.	49
5.3	Bi kanalen kasurako Whittle indize normalizatuak kanal egoera probabilitate desberdinentzat. $\alpha = 1.5$ eta $\mathbb{E}[X] = 5$ Mb duen Pareto banaketa erabiltzen da, $r_1 = 8.4$ Kb eta $r_2 = 16.8$ Kb izanik.	50
5.4	Hiru kanalen kasurako Whittle indize normalizatuak bataz besteko tamaina desberdinentzat. $\alpha = 1.5$ duen Pareto banaketa erabiltzen da, $q_1 = q_2 = q_3 = 1/3$, $r_1 = 8.4$ Kb, $r_2 = 16.8$ Kb eta $r_3 = 33.6$ Kb izanik.	51
5.5	Hiru kanalentzako Whittle indize normalizatuak. $\alpha = 1.5$ eta $\mathbb{E}[X] = 0.5$ Mb duen Pareto banaketa erabiltzen da, $q_1 = q_2 = q_3 = 1/3$, $r_1 = 1$ Mb, $r_2 = 2$ Mb eta $r_3 = 3$ Mb izanik.	52
5.6	Hiru kanalen kasurako Whittle indize normalizatuak kanal egoera probabilitate desberdinentzat. $\alpha = 1.5$ eta $\mathbb{E}[X] = 5$ Mb duen Pareto banaketa erabiltzen da, $r_1 = 8.4$ Kb, $r_2 = 16.8$ Kb eta $r_3 = 33.6$ Kb izanik.	53
5.7	μ errorea.	59
5.8	Erabiltzaile baten QoE-aware egoera diagrama berriaren zatia.	63
5.9	Whittle indizeak eskuratutako zerbitzuaren eta atzerapenaren menpe bi kanalen kasurako. $\alpha = 1.5$ eta $\mathbb{E}[X]=5$ Mb duen Pareto banaketarentzat, $q_2 = 0.5$, $r_1 = 8.4$ Kb, $r_2 = 16.8$ Kb, $d_{\min} = 2$ s eta $d_{\max} = 9$ s izanik.	67
5.10	Whittle indizeak kanal egoera probabilitate ezberdinentzat. $\alpha = 1.5$ eta $\mathbb{E}[X]=5$ Mb duen Pareto banaketarentzat, $r_1 = 8.4$ Kb, $r_2 = 16.8$ Kb, $d_{\min} = 2$ s eta $d_{\max} = 9$ s izanik.	68

6.1	Kanal konstanteko errendimenduaren analisirako agertokien aukeraketa estrategiaren laburpena.	83
6.2	Kanal aldakorreko errendimenduaren analisirako agertokien aukeraketa estrategiaren laburpena.	86
6.3	Klase anitzeko errendimenduaren analisirako agertokien aukeraketa es- trategiaren laburpena.	89
6.4	Erabiltzaile baten CQI trazaren adibidea A_{16} ALTE agertokian.	93
6.5	CQI burstlength-en CCDF-a A_{16} ALTE agertokian.	93
6.6	$\mathbb{E} [\text{MOS}]$ KBO (ezkerrean), $\text{KBT}\alpha$ (erdian), KBTb (eskuinean) agertokietan.	96
6.7	$\mathbb{E} [d]$ KBO (ezkerrean), $\text{KBT}\alpha$ (erdian), KBTb (eskuinean) agertokietan.	97
6.8	Jain_{MOS} KBO (ezkerrean), $\text{KBT}\alpha$ (erdian), KBTb (eskuinean) agertokietan.	98
6.9	Jain_d KBO (ezkerrean), $\text{KBT}\alpha$ (erdian), KBTb (eskuinean) agertokietan.	98
6.10	Atzerapenaren PDF-a KBO agertokian ($\rho = 0.95$).	99
6.11	Atzerapenaren CDF-a KBO agertokian ($\rho = 0.95$).	100
6.12	MOS-aren funtzio estatistikoak KBO agertokian ($\rho = 0.95$).	102
6.13	Errendimendu metriken emaitzak KBQ agertokian.	104
6.14	KBQ eta KBO agertokien arteko $\mathbb{E} [\text{MOS}]$ erkaketa.	104
6.15	Errendimendu metriken emaitzak KBK agertokian.	105
6.16	Erabiltzaile kopuruaren bilakaera denborala oinarritzko agertokian.	106
6.17	$\mathbb{E} [\text{MOS}]$ A_2 BO agertokian.	108
6.18	Erabiltzaile kopuruaren bilakaera denborala (ezkerrean) eta CDF-a (es- kuinean) A_2 BO agertokian $\rho = 0.95$ denerako.	109
6.19	$\mathbb{E} [d]$ A_2 BO agertokian.	110
6.20	Jain_{MOS} (ezkerrean) eta Jain_d (eskuinean) A_2 BO agertokian.	110
6.21	Atzerapenaren PDF-a A_2 BO agertokian ($\rho = 0.95$).	112
6.22	Atzerapenaren CDF-a A_2 BO agertokian ($\rho = 0.95$).	112
6.23	MOS-aren funtzio estatistikoak A_2 BO agertokian ($\rho = 0.95$).	113
6.24	Errendimendu metriken emaitzak A_2 BKq agertokian.	114
6.25	Errendimendu metriken emaitzak A_2 BKr agertokian.	115
6.26	Errendimendu metriken emaitzak A_2 BQ agertokian.	116
6.27	A_2 BQ eta A_2 BO agertokien arteko $\mathbb{E} [\text{MOS}]$ erkaketa.	117
6.28	Errendimendu metriken emaitzak A_2 BTb agertokian.	118
6.29	Errendimendu metriken emaitzak A_2 BOnOff agertokian.	119
6.30	Errendimendu metriken emaitzak A_5 BOp agertokian.	120
6.31	Errendimendu metriken emaitzak A_5 BP agertokian.	121
6.32	Errendimendu metriken emaitza globalak KATb agertokian.	123
6.33	$\mathbb{E} [\text{MOS}]$ klaseka KATb agertokian.	124

6.34	Errendimendu metriken emaitza globalak KAQ agertokian.	125
6.35	\mathbb{E} [MOS] klaseka KAQ agertokian.	126
6.36	Errendimendu metriken emaitza globalak KAK agertokian.	127
6.37	\mathbb{E} [MOS] klaseka KAK agertokian.	129
6.38	Errendimendu metriken emaitza globalak A_2AKq agertokian.	130
6.39	\mathbb{E} [MOS] klaseka A_2AKq agertokian.	131
6.40	$\mathbb{E}[d]$ klaseka A_2AKq agertokian.	132
6.41	Errendimendu metriken emaitza globalak A_2AKr agertokian.	133
6.42	\mathbb{E} [MOS] klaseka A_2AKr agertokian.	134
6.43	$\mathbb{E}[d]$ klaseka A_2AKr agertokian.	135
6.44	Errendimendu metriken emaitza globalak A_2AQc agertokian.	136
6.45	\mathbb{E} [MOS] klaseka A_2AQc agertokian.	137
6.46	$\mathbb{E}[d]$ klaseka A_2AQc agertokian.	138
6.47	Errendimendu metriken emaitza globalak A_2ATb agertokian.	139
6.48	\mathbb{E} [MOS] klaseka A_2ATb agertokian.	140
6.49	$\mathbb{E}[d]$ klaseka A_2ATb agertokian.	141
6.50	Errendimendu metriken emaitza globalak A_5AKq agertokian.	142
6.51	\mathbb{E} [MOS] klaseka A_5AKq agertokian.	143
6.52	$\mathbb{E}[d]$ klaseka A_5AKq agertokian.	144
6.53	Errendimendu metriken emaitza globalak $A_{16}ALTE$ agertokian.	145
6.54	\mathbb{E} [MOS] klaseka $A_{16}ALTE$ agertokian.	146
6.55	$\mathbb{E}[d]$ klaseka $A_{16}ALTE$ agertokian.	147

Taulen Zerrenda

3.1	MOS-aren eta erabiltzailearen asebetetzearen arteko erlazioa.	17
3.2	Erabiltzaileen QoE eta tamaina ezaugarriak.	26
3.3	Atzerapen berdinerako politika optimoa.	26
3.4	Atzerapen ezberdinerako politika optimoa.	26
6.1	CQIak eta hauei dagozkien kanal abiadurak (Mbps).	80
6.2	Simulazio parametroak.	82
6.3	Parametro multzoa kanal konstanteko klase bakarraren kasuko agertokietan.	84
6.4	CQI-ak eta horien goranzko ordeneko kanal-egoera probabilitateak.	87
6.5	CQI-ak eta horien beheranzko ordeneko kanal-egoera probabilitateak.	87
6.6	Parametro multzoa kanal aldakorreko klase bakarraren kasuko agertokietan.	88
6.7	Kanal-egoera probabilitateak kasu estatikoan.	90
6.8	Kanal-egoera probabilitateak kasu dinamikoan.	92
6.9	Parametro multzoa klase anitzeko kasuko agertokietan.	94
6.10	ASPIM eta GWM diziplinen konparaketa taula.	149

1. Kapitulu

Sarrera

Ezbairik gabe, Internet behar-beharrezkoa bilakatu da eguneroko bizitzan, eta horrek datu sareen, bereziki sare mugikorren, erabilera masiboa bultzatu du. IP zerbitzuen edo aplikazioen (web, multimedia etab.) erabileraren igoera horrek sareko banda zabalera eskaeraren hazkundera eragin du. Orduan, bukaerako erabiltzaileak zerbitzuaren kalitatean (QoS) hornitzeko sare baliabideen partekatze eta erabilera efizientea izatea oso garrantzitsua da. Nahiz eta telekomunikazio estandarrek QoS arkitekturak definitu [3GPP'2010; ITU-T'2004; Poryazov'2011; Meddeb'2010], ez dute sare baliabideen kudeaketarako planifikazio estrategia espezifikorik zehazten. Beraz, errendimendu egokia bermatzeko planifikazio edo *scheduling* algoritmoen diseinu egokia funtsezkoa da.

Tradizionalki, sare baliabideen esleipena sare parametro objektiboetara (atzerapena, abiadura, paketeen galera etab.) orientatzen da, bukaerako erabiltzaileen benetako asetzea alde batera utziz. Hala ere, erabiltzaileen asebetetzean oinarritutako baliabideen esleipen ikuspegi hori ezinbestekoa da, eta sare operadoreek zein hornitzaileek motibazio argia erakutsiko lukete euren bezeroen gogobetetzea lortzeko. Era honetan, zerbitzuaren kalitate subjektiboaren maximizazioa helburutzat duen sare baliabideen planifikazio estrategien beharra ikusita, tesi lan honetan **erabiltzaileak hautemandako kalitatea optimizatzen duten scheduling algoritmoak proposatzeari** ekingo zaio.

1.1 Tesiaren aurrekariak

Scheduling algoritmoak optimizazio problema bezala egokiro formula daitezke. Gainera, planifikatzailea edo *scheduler*-a kontrolatzaile bat bezala ikus daiteke, zeinetan kontrol akzioa aukeratuko den erabiltzailea zehaztean datzan. Orduan, planifikazio algoritmo horiek kontrol edo erabaki problema bezala formula daitezke. Ildo honetan, baliabide esleipen estokastikoaren eta dinamikoaren problemak naturalki modela daitezke Markov-en Erabaki Prozesuen (MDP) [Puterman'1990; Massey'2004; Al-Zubaidy'2012] markoan.

Hala ere, MDP-an oinarritutako optimizazio ikuspegia matematikoki dotorea izanik, kontrol prozesu markoviar horiek optimizazio problema errealean ebazpenerako erabiltzearen eragozpen nagusia problema praktikoa gehienak ebazteko beharrezko memoria eta prozesamendu betekizunak lortezinak direla da [Papadimitriou'1987; Chen'2012]. Hori ekiditeko, baliabide kudeaketa optimizazio problema MDP bezala formulatzea, eta ondoren, kontsideratutako problema konplexu eta ez-tratagarriaren soluziotzat azpi-optimoa edota optimoa den heuristika erraza lortzea aproposagoa da. Heuristika sinple horien artean **indize erregela** motako planifikazio estrategiak aurkitzen dira [Jacko-a'2011; Bolia'2009]. Indize erregela baten filosofia erabiltzaile bakoitzerako indize deitutako lehentasuna islatzen duen balio bat kalkulatzeko datza, eta era honetan, schedulerrak indize altuena duen erabiltzailea aukeratuko du transmisio une bakoitzean. Modu honetan, scheduling eredu analitiko horien ebazpenean lehentasunean oinarritutako indize erregela motako soluzioak eskuratzea erabilgarria suertatzen da.

Bestaldetik, urteetan zehar ikertzaileek **planifikazioa** bai pakete mailan (adibidez, [Tassioulas'1993; Stolyar'2004; Sadiq'2009]) bai **fluxu mailan** (esate baterako, [Avrachenkovt'2004; Borst'2005; Sadiq'2010; Ayesta'2010]) esploratu dute. Lehenengoak, erabiltzaile iraunkor kopuru mugatua existitzen dela onartzen du, schedulerraren helburua iladako paketeen batz besteko atzerapena minimizatzea delarik. Bigarrenean, berriz, erabiltzaileak zorizko moduan heltzen dira sistemara, eta euren tamaina finituko zerbitzu eskakizuna jasotzerakoan sistematik atera; horrek erabiltzaileak hautemandako errendimendua hobeto harrapatzen du, ikuspegi hori ikerketa honetara hobeto egokitzen delarik.

Zalantzarik gabe, gehien aztertutako baliabide esleipen problemek erabiltzaile trafiko fluxuen batz besteko atzerapenaren minimizazioa dute helburutzat. Eraitza klasikoek fluxu laburrei lehentasuna emateak guztirako batz besteko atzerapena minimizatzen duela adierazten dute [Kleinrock'1976; Avrachenkovt'2004]. Dena dela, egungo IP sare sistemetan fluxuen tamaina aurretik jakitea ez da arrunta. Hori dela eta, badira

non-anticipating edo aurreratu gabeak deitutako aurretik fluxuaren tamaina ez dakiten tamainan oinarritutako scheduling diziplinak [Aalto'2008], eta hauek fluxu batek momentura arte kanalera transferitutako bit kopurua, *attained service*-a edo eskuratutako zerbitzua, erabiltzen dute tamaina informazio bezala. Arlo honetan lanik aipagarriena **Gittins indize** estrategia da [Gittins'1979; Aalto'2011], zeinak, bataz besteko atzerapena minimizatzeko problema MDP plataforman formulatuta izanda aurretik, eskuratutako zerbitzua kontuan hartuta atzerapenaren bataz bestekoa minimizatzen duen indize erregela sinplea proposatzen duen **kanal kapazitatea konstantea** denean.

Bestalde, haririk gabeko edo *wireless* sistemetan azken hamarkadako aurrerapen teknologikoek erabiltzaileen artean irrati baliabide eskasen esleipenerako planifikazioaren interesa piztu dute. Haririk gabeko loturetan kanalaren kapazitatea aldatzen da denboran zehar ingurunea beraren degradazioen (*fading*, *shadowing* eta interferentziak) ondorioz, eta horrek denboran aldakorrak diren kanaletan scheduling problemaren ikerketa bultzatu du. *Channel-aware* edo *opportunistic* deitutako scheduler-ek aldiuneko kanal onena duten erabiltzaileei lehentasuna ematen diete. Literaturan zehar zenbait channel-aware estrategia aztertu badira ere, Max Rate eta Proportional Fair [Aalto'2010] ezagunen artean, denboran aldakorrak diren zerbitzu tasa duten ereduaren soluzio optimoa lortzeko ebazpena oso zaila eta ezezaguna da. [Ayesta-a'2011; Ayesta'2010] lanetan bataz besteko atzerapenaren problema denboran aldakorra den kanalean MDP baten bidez formulatzen da, eta analitikoki ebaztearen ezintasuna dela eta, hurbilketak erabiltzen dira. Batetik, [Ayesta-a'2011] ikerketak kanal determinista baterako jatorrizko Gittins indizea aldatuz heuristika bat proposatzen du. Bestetik, [Ayesta'2010] azterketan **zorizko kanal kapazitatearen** kasurako eta fluxuen tamainaren banaketa esponentziala izanda, *restless bandits* eta **Whittle indize** ikuspegiari [Whittle'1988] jarraituta, *Potential Improvement* (PI) deituriko optimotik hurbil dagoen indize erregela lortzen da [Ayesta-b'2011]. Hala ere, **denboran aldakorra den zorizko kanalean tamaina banaketa orokorrerako bataz besteko atzerapenaren problema aztertze**ar geratzen da.

Alabaina, literaturan zehar QoS parametro ezberdinak helburutzat dituzten planifikazio eskemak proposatu badira ere [Pinedo'2012], atzerapenaren minimizazioa edota *throughput*-aren maximizazioa besteak beste, erabiltzailearen hautemandako kalitate subjektiboaren maximizazioa xedetzat duten baliabideen esleipen estrategiei ez zaie beharrezko arreta jarri. Erabiltzailearen kalitate subjektiboari dagokionez, erabiltzaileak hautemandako/esperimentatutako kalitatea adierazteko **QoE** terminoa halaxe definitzen du ITU-T-k [ITU-T'2007]: "Bukaerako erabiltzaileak hautemandako zerbitzu edo aplikazio baten onargarritasun orokorra" (QoE-rako antzeko definizioak [Ibarrola'2010; Stankiewicz'2011; LeCallet'2012] lanetan biltzen dira). Testuinguru honetan, **QoE-a maximizatzea helburutzat duten** analitikoki tratagarriak eta ondo funtzionatzen duten in-

dize erregelak proposatzearen beharra agerian geratzen da. Nahiz eta *QoE-aware* den sare baliabideen kudeaketa arloan lan gutxi batzuk existitu [Khan'2008; Thakolsri'2009; Ameigeiras'2010; Cerqueira'2009], scheduling eremuan analitikoki hain ekarpen handia izan duten **Gittins eta Whittle bezalako ikuspegietan oinarrituz ez da QoE-a maximizatzeko indize erregularik proposatu, ezta QoE-aware den baliabideen kudeaketarako MDP eredurik definitu ere.**

Ondorio bezala, **trafiko fluxuen planifikaziorako optimizazio arloan aurkitutako gabeziak** hurrengoetan labur daitezke:

- **QoE-aren maximizazioa helburutzat duen planifikaziorako eredu analitikorik ez izatea.** Aurreko lanak QoS-an zentratzen dira, QoE-aren optimizazioa kontuan hartu gabe. Gainera, MDP markoan ez da QoE-aware eredurik definitu.
- **Scheduling arloan garrantzi handia izan duten metodo matematikoetan oinarria duen QoE-aren maximizaziorako scheduling indize erregularik ez existitzea.** Gittins eta Whittle metodoak erabilia batz besteko atzerapena minimizatzeko indize erregelak proposatu diren arren, batz besteko QoE-a maximizatzea helburutzat duen planifikazioan ez dago metodo horietan oinarritutako indize erregularik.
- **Denboran ausaz aldatzen den kanalean tamaina banaketa orokorrerako batz besteko atzerapena minimizatzen duen indize erregularik ez egotea.** Zorizko kanal aldakorrean fluxu esponentzialentzat batz besteko atzerapenaren minimizaziorako Whittle-n oinarritutako proposamenak existitzen badira ere, errealitatea hobeto islatzen duten beste fluxu tamaina banaketentzat ez da indize erregularik proposatu.

Modu honetan, gabezia horiek 1.2 sekzioan aurkezten diren tesi lan honen helburuak determinatzen dituzte.

1.2 Helburuak

Aurreko atalean zehaztutako gabeziei aurre egiteko asmoz, tesi honen helburu nagusia sare baliabideen esleipenean QoE-a maximizatzeko eredu analitikoa definitzea eta honen ebazpenaren soluziotzat QoE-aware diren indize erregela sinpleak proposatzea da. Eredu hori eta indize erregela horiek lortzeko metodologia matematika aplikatua esparruan ekarpen handia izan duten metodo analitikoetan oinarritzen direla aipagarria da.

Helburu orokor hori lan honen xedea era zehaztuan espezifikatzen duten zenbait helburu partzialetan bana daiteke:

- **QoE-aware den scheduling problema orokorrerako eredu analitiko orokor baten proposamena**, zeina QoE optimizazio problema ezberdinak era analitikoan tratatzeko funtsa izango den. Modelaketa hori MDP markoan egingo da.
- **QoE-aware den indize erregelaren proposamena kanal konstantean**, zeinak arestian aipatutako MDP QoE-aware-a kanal konstantearen kasuan ebaztea ahalbidetuko duen. Ebazpen metodologia horrek Gittins eta Whittle metodoetan izango du oinarria.
- **QoE-aware den indize erregelaren proposamena denboran aldakorra den kanalean**, zeinak lehen aipatutako MDP QoE-aware-ari denboran aldakorra den kanalaren kasurako soluzioa emango dion. Erabiliko den ebazpen teknika Whittle-n oinarritzen da.
- **Banaketa orokorreko fluxuen tamainetarako denboran aldakorra den kanalean atzerapenaren minimizaziorako indize erregelaren proposamena**, zeinaren Whittle-n oinarritutako ebazpen metodologia aurreko denboran aldakorra den kanalean QoE optimizazio problema ebazteko funtsa izango den.
- **Proposatutako indize erregela horien balioztatzea** sare agertoki ezberdinetan, euren funtzionamendua ona dela egiaztatzeko asmoz. Horretarako, proposamen horien errendimendua planifikazio estrategia ezagunenek erakusten dutenarekin alderatuko da.

1.3 Dokumentuaren egitura

Dokumentu hau zazpi kapituluetan egituratuta dago.

2. Kapituluak tesian zehar erabiliko diren erreminta analitikoak deskribatzen dira. Batetik, MDP ereduen ezaugarri garrantzitsuenak azpimarratzen dira. Bestetik, Gittins zein Whittle indize erregelen metodologia eta definizioa ematen da, eta euren propietate nagusiak azaltzen dira.

3. Kapituluak, behin QoE-aren maximizaziorako planifikazio problema deskribatuta, proposatutako QoE-aware MDP eredu orokorra aurkezten du. Horrez gain, eredu horren soluzio optimoa eskuratzeari buruzko gaia tratatzen da.

4. Kapituluak, aurreko kapituluak QoE-aware MDP eredu proposamenean oinarrituz, kanal kapazitatea konstantea denerako QoE-aren maximizaziorako indize erregela proposatzeari ekiten zaio. Horretarako, Gittins zein Whittle metodoak erabilita kalitate subjektiboan oinarritutako scheduling indizearen adierazpen analitikoa lortzen da.

5. Kapituluak denboran aldakorra den kanalerako indize erregela proposamenak ondorioztatzen dira, abiapuntua kasu bakoitzean optimizatu nahi den problemari dagokion MDP eredu izanik. Kapitulu hau bi puntu nagusietan banatzen da. Lehenik eta behin, banaketa orokorra duten fluxu tamaintzat batz besteko atzerapena minimizatzea helburutzat duten Whittle-n oinarritutako politikak lortzeko prozesua eta emaitzat eskuratutako indize erregela berriak aurkezten dira. Ostean, aurreko atzerapenaren minimizazio problemaren ebazpenerako erabilitako metodologian oinarrituz QoE-a maximizatzea helburutzat duen QoE-aware Whittle indize hurbildua lortzeari ekiten zaio.

6. Kapituluak aurreko kapituluetan proposatutako planifikazio estrategien funtzionamendua balioztatzea du helburu. Horretarako, behin balioztatze metodologia ego-koro definituta, kanal konstantean QoE-aren maximizazioa xedetzat duen indize erregelaren balioztatzea egiten da, kanal konstanteko agertokietan bere errendimendua aztertuz. Ondoren, proposatutako scheduling algoritmoen errendimendua analizatzen da kanal aldakorreko sare agertokietan. Horrez gain, planifikazio proposamen berri horien balioztatzea erabiltzaile klase mota desberdinen presentzian ere egiten da.

7. Kapituluak burututako lanaren ondorio edo emaitza garrantzitsuenak deskribatzen dira laburpen gisa. Gainera, aurrean existitzen diren ikasketekiko egindako ekarpenen zein sareen baliabideen planifikazio, QoE eta QoS arloetan doktoregaiaren kontribuzioen inguruan xehetasunak ematen dira. Horrez gain, burututako lanetik eratorritako etorkizuneko lerroak adierazten dira.

Bukatzeko, dokumentuan zehar erabilitako erreferentziak, frogapen matematikoen eranskina eta dokumentuan zehar erabilitako akronimoen glosategia biltzen dira.

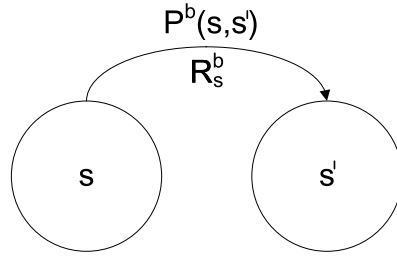
2. Kapituluia

Erabilitako marko analitikoari sarrera: MDP, eta Gittins eta Whittle indize erregelak

Lan honetan scheduling problemen MDP ereduaren diseinuari ekingo zaio, eta ondoren, horien ebazpenerako Gittins eta Whittle metodoak erabilia indize erregela motako planifikazio estrategiak proposatuko dira. Hori dela eta, kapitulu honetan bai MDP bai bi indize erregela horien definizioa, metodologia, eta ezaugarri nagusiak azpimarratuko dira, hurrengo kapituluetan tresna analitiko horiek sare baliabideen esleipen kasu ezberdinetara aplikatu edota moldatuko direlarik. Modu honetan, hautatutako marko analitikoari buruzko xehetasunak emateaz gain, tesian zehar erabiliko den nomenklatura zehaztuko da.

2.1 MDP

MDP bat erreminta matematiko indartsua da [Puterman'1990], zeina optimizazio problema ugari aztertzeke erabiltzen den. MDP-a denbora diskretuko kontrol prozesu bat bezala defini daiteke. Denbora une bakoitzean, prozesua $s \in \mathcal{S}$ egoera baten dago, eta erabakitzaile batek egoera horretan eskuragarri dagoen akzio bat, $b \in \mathcal{B}$, aukeratuko du, dagokion R_s^b saria jasoz. Orduan, prozesua beste egoera berri batera, s' , mugitzen da zoriz, $P^b(s, s')$ probabilitatearekin. MDP baten aipatutako elementu horiek 2.1 Irudian erakusten dira.



2.1 Irudia: MDP baten elementuen aurkezpena.

Kontrol akzio bat une jakin batean hartutako erabakia da, eta politika bat, berriz, denboraren funtzio bezala eta kontroladoreak eskuragarri duen informazioa erabilia akzioak aukeratzeko erregela da. Era honetan, erabakitzaileak ustiapenaren eta miaketaren arteko konpromisoari aurre egiten dio. Batetik, ustiapena orainaldian momentuko sari altuena eskuratzean datza. Bestetik, miaketaren bidez etorkizunean sari altuago posiblea lortu nahi da, sistemari buruz ikasiz eta sari altuagoak jasoz geroago.

Scheduling optimizazio problemaren kasurako, MDP baten akzioak transmisio denbora une bakoitzean zein erabiltzaile aukeratu zehaztuko du, guztirako saria maximizatzeko helburuarekin. Beraz, MDP-aren eboluzioak scheduling politika, $\pi \in \Pi$, zehaztuko du, Π aztertutako problemarako onargarriak diren politika multzoa delarik. Bestetik, MDP eredu baten definizioan saria egokiro definitu behar da scheduling problemaren optimizatu nahi den parametroaren optimizazioa lortzeko. Hau ikusita, sisteman dauden $k \in \mathcal{K}$ erabiltzaileen une bakoitzeko saria eta akzioa kontuan hartuz, MDP-ari dagokion optimizazio problema hori era orokorrean horrela adieraz daiteke:

$$\begin{aligned} \max_{\pi \in \Pi} \mathbb{E}_0^\pi \left[\sum_{t=0}^{\infty} \sum_{k \in \mathcal{K}} \beta^t R_{k, s_k(t)}^{b_k(t)} \right] \\ \sum_{k \in \mathcal{K}} b_k(t) = M \quad \forall t \end{aligned} \quad (2.1)$$

non $0 < \beta \leq 1$ sarien balioa denboran zehar esponentzialki gutxitzeko deskontu faktorea den, eta \mathbb{E}_0 hasierako uneko informazioaren menpekoea den itxaropena. Baldintzak une bakoitzean transmisiorako M erabiltzaile aukeratuko direla adierazten du, hauen akzioaren balioa une horretan 1 izanik eta gainontzeko erabiltzaileentzat 0.

Teorikoki, MDP oro era optimoan ebatz daitezke programazio dinamikoaren [Bertsekas'1995] eta programazio linealaren [Schrijver'1998] bidez. Demagun $V^*(s)$ lortu daitekeen balio-funtzio optimoa dela π^* politika optimoa aplikatzen denean. Balio-funtzio optimo batek honako ekuazioa betetzen du beti:

$$V^*(s) = \max_{b \in \mathcal{B}} \left[R_s^b + \beta \sum_{s' \in \mathcal{S}} P^b(s, s') \cdot V^*(s') \right] \quad (2.2)$$

(2.2) Bellman-en ekuazioa [Bellman'1966] deitzen da, eta bere optimalitate printzipioak hauxe adierazten du: "Edozein denbora unetan, politika optimoak lortutako momentuko saria eta guztirako sariaren batura optimizatzen duen akzioa agindu behar du, hurrengo denbora unean politika optimoa aplikatzen bada". Hala ere, egoera bakoitzerako ekuazio hori ebazteko metodoaren independenteki, normalean scheduling problemaren MDP eredu errealistentzat soluzio optimoaren konputazio numerikoa ez da bideragarria itzelako egoera-espazioa dela eta, zeina *dimentsionamendu maldizio* bezala ezagutzen den.

Dimentsionamendu maldizioa ekiditeko beste ebazpideak existitzen dira, hala nola programazio dinamiko hurbildua [Zhang'2008] eta pausu-bateko hobekuntza [Boutilier'1995]. Dena dela, balio-iterazio, politika-iterazio eta programazio linear estrategiak bezalako MDP ebazpen metodo tradizionaletan [Puterman'1990] bezalaxe, problema horien soluzioa egoera bakoitza akzio bakoitzera mapeatzen duen taula bat da. Modu honetan, erabakiak hartzeko prozesuan erabakitako akzioa identifikatzeko taulan bilatzen da. Biltegitarte ikuspuntutik, alabaina, egoera bakoitza bere akzio optimoarekin mapeatuta bilaketa-taulan gordeta izatea desagokia da eta batzuetan ezinezkoa ere.

Ondorioz, scheduling problemaren formulazio analitikoa MDP eredu baten bidez egitea aproposa bada ere, honen ebazpenerako matematikoki eta konputazionalki tratagarria den metodoaren beharra agerian azaltzen da. Lan honetan eredu analitiko horien ebazpenerako Gittins eta Whittle metodoak erabilia indize erregela motako soluzioak lortuko dira. Gittins-en zein Whittle-n oinarritutako indize erregela horien eskuratzeko metodologiaren inguruko xehetasunak hurrengo sekzioan ematen dira.

2.2 Indize erregelak

Sare baliabideen planifikazio arloan, indize erregela baten funtsa erabiltzaile bakoitzari esleipen indize bat eman, eta ondoren indizearen bidezko hurrengo lehentasun politika aplikatzean datza: “Baliabidea esleitu uneko indize altuena duen erabiltzaileari”. Indize politikaren optimalitatearen adibide klasiko bat $c\mu$ erregela da [VanMieghem’1995], zeinak itzarote kostua minimizatzen duen tamaina esponentzialentzat, itzarote kostu konstantea eta batuz besteko tamainaren arteko zatidura altuena duen fluxua aukeratzeko delarik. Hala ere, indize hori estatikoa da, Gittins [Gittins’1979] eta Whittle [Whittle’1988] indizeak ez bezala, zeinak transmisio une bakoitzean erabiltzailearen oraingo egoeraren menpekoak diren indize dinamikoak diren.

Jarraian Gittins eta Whittle indize horiek karakterizatzen dira.

2.2.1 Gittins indizea

Gittins-en estrategia [Gittins’1979; Weber’1992] baliabidea erabiltzean uneko produktibitate altuena duen erabiltzaileei baliabideak esleitzean datza. Indize hori erabiltzaile bakoitzarentzat era isolatuan kalkulatzen da, beste erabiltzaileen independenteki. Kasu horretan, erabiltzaile bakoitzaren eredu estokastikoa modelatzen duen MDP-ak ez du egoera aldaketarik ezta sari irabazpenik jasaten erabiltzailea aukeratzeko ez denean.

Demagun k erabiltzaile bat planifikatzen den bakoitzean W kargua ordaintzen duela. Kargu inpartziala, G_k , aukera optimoak errentagarritasunik ezta galerarik eragiten ez duen kargu maila bezala definitzen dugu. Orduan, G_k planifikatzailearen kostu-itxaropena k fluxuaren informazioa τ denbora une jarraian transmitituz lortutako sari-itxaropenarekin orekan egotea eragiten duen W karguaren balioa da ((2.3) begiratu).

$$G_k(s_k) = \sup_{\tau \geq 1} \left[\mathbb{E}_0 \left[\sum_{j=0}^{\tau-1} \beta^t (R_{k,s_k}^1(j) - W) \right] = 0 \right] \quad (2.3)$$

(2.3) ebatziz Gittins indizea lortzen da.

2.1 Definizioa. Gittins indizea honakoa da:

$$G_k(s_k) = \sup_{\tau \geq 1} \frac{\mathbb{E}_0 \left[\sum_{j=0}^{\tau-1} \beta^t R_{k,s_k}^1(j) \right]}{\mathbb{E}_0 \left[\sum_{j=0}^{\tau-1} \beta^t \right]} = \sup_{\tau \geq 1} J(s_k, \tau) = \frac{R_k^\tau}{W_k^\tau} \quad (2.4)$$

Hortaz, Gittins indizea k erabiltzailea τ denbora une jarraian transmititzeko aukeratzeko bada irabazitako guztirako sari-itxaropenaren, R_k^τ , eta τ unetan transmititzea era-

bakita sisteman egondako denbora-itxaropenaren, W_k^τ , arteko ratioa da. Hau da, gelditzeko denbora arbitrario baten menpekoea den sari-itxaropena denbora deskontatuko unitate bakoitzeko maximizatzen da. $J(s_k, \tau)$ sari/inbertsio horren ratioaren menpekoea den efizientzia funtzio bat bezala definitzen dugu.

Planifikazio arloan Gittins-en lanaren inguruan lortutako emaitzarik garrantzitsue-
na erabiltzaile bakoitzaren egoeran fluxuaren eskuratutako zerbitzua soilik kontuan
hartzten denean Gittins indize erregelak batz besteko atzerapena minimizatzen due-
la da, zeina [Aalto'2011] ikerketan frogatzen den.

2.2.2 Whittle indizea

Whittle-n ideia [Whittle'1988] planifikazio erregela sinplea lortzeko zerbitzatzeko lehen-
tasun dinamikoa neurtzeko funtzioa eskuratzean datza. Whittle indizeak, erabiltzaile
bakoitzerako era isolatuan, egoera bakoitzean zerbitzatzeko eraginkortasun itxaropena
neurtzen du. Hala ere, Gittins-en markoan ez bezala, nahiz eta erabiltzailea aukeratua
ez izan, erabiltzaile bakoitzaren MDP ereduan egoera aldaketak eta sari irabazpenak
onartzen dira, *restless* deitutako problemen motakoa izanik. Restless motako problema
eta honen indizeen bidezko soluzioa [Whittle'1988] lanean sortu ziren, Gittins indize
erregela orokortuz. Mota hauetako problemetzako une bateko lan osagaia definitzen
da erabiltzaile bakoitzerako, W^b , zeinak uneko akzioaren balio bera duen.

Whittle-n arabera (2.1) adierazpenaren bidez formulatutako optimizazio problema
erlaxatu daiteke une bakoitzean batz beste M erabiltzaile zerbitzatzuz [Whittle'1988],
eta ondoren, metodo Lagrangiarrak (ikus [Visweswaran'2009]) erabilia erabiltzaile
bakarreko prezioan oinarritutako optimizazio problema parametrizatuan deskonposa
daiteke. v prezio batentzat, hona hemen k erabiltzailearen azpi-problema:

$$\max_{\pi_k \in \Pi} \sum_{t=0}^{\infty} \mathbb{E}_0^{\pi} \beta^t \left[R_{k, s_k(t)}^{b_k(t)} - v \cdot W_{k, s_k(t)}^{b_k(t)} \right] \quad (2.5)$$

v lagrangiarr parametroa une bateko zerbitzu kostu bezala interpreta daiteke.

2.2 Definizioa. (2.5) problema indexablea dela deritzogu $s \in S$ guztientzat
 $v_s^* \in \mathbb{R} \cup \{-\infty, \infty\}$ balioak existitzen badira zeinak

- (i) s egoeran erabiltzailea zerbitzatzea optimoa den baldin eta $v_s^* > v$,
- (ii) s egoeran erabiltzailea zerbitzatzea ez den optimoa baldin eta $v_s^* < v$, eta
- (iii) s egoeran erabiltzailea zerbitzatzea edo ez zerbitzatzea optimoa den baldin eta
 $v_s^* = v$.

v_s^* balio hauek Whittle indizearen balioak dira, zeinak v lagrangiar parametroaren errentagarritasun-atalase balioak diren, eta problemarako indize politika optimoa definitzen dute.

Bestalde, defini dezagun $\mathcal{F} \subseteq \mathcal{S}_k$ zerbitzatze multzoa, zeinak s egoeran dagoen k erabiltzaile bat zerbitzatzea agintzen duen baldin $s \in \mathcal{F}$ bada, eta erabiltzaile hau ez zerbitzatzea agindu baldin $s \notin \mathcal{F}$. Modu honetan, (2.5) problema horrela berridatz daiteke:

$$\max_{\mathcal{F} \subseteq \mathcal{S}_k} \mathbb{R}_{k,s}^{\mathcal{F}} - v \mathbb{W}_{k,s}^{\mathcal{F}} \quad (2.6)$$

non $\mathbb{R}_s^{\mathcal{F}}$ eta $\mathbb{W}_s^{\mathcal{F}}$ s egoeran guztirako sari itzaropena eta guztirako lan itzaropena diren hurrenez hurren. Hemendik aurrera k erabiltzaileari dagokion etiketa kenduko da.

Bestetik, demagun $\langle b, \mathcal{F} \rangle$ politika, zeinak hasierako egoeran b akzioa eta ondoren \mathcal{F} politika erabiltzen duen. Honela, $v = v_s = v_s^*$ kasuan zerbitzatzea eta ez zerbitzatzea optimoak izanik:

$$\mathbb{R}_s^{\langle 1, \mathcal{F}^* \rangle} - v_s^* \cdot \mathbb{W}_s^{\langle 1, \mathcal{F}^* \rangle} = \mathbb{R}_s^{\langle 0, \mathcal{F}^* \rangle} - v_s^* \cdot \mathbb{W}_s^{\langle 0, \mathcal{F}^* \rangle} \quad (2.7)$$

(2.7) ekuazioan v_s^* bakanduz Whittle indizea eskuratzen da.

2.3 Definizioa. Whittle indizea honela adieraz daiteke:

$$v_s^* = v_s^{\mathcal{F}} = \frac{\mathbb{R}_s^{\langle 1, \mathcal{F} \rangle} - \mathbb{R}_s^{\langle 0, \mathcal{F} \rangle}}{\mathbb{W}_s^{\langle 1, \mathcal{F} \rangle} - \mathbb{W}_s^{\langle 0, \mathcal{F} \rangle}} = \frac{r_s^{\mathcal{F}}}{w_s^{\mathcal{F}}} \quad (2.8)$$

$$\text{non } \mathbb{R}_s^{\langle b, \mathcal{F} \rangle} = R_s^b + \beta \sum_{s' \in \mathcal{S}} P^b(s, s') \mathbb{R}_{s'}^{\mathcal{F}} \text{ eta } \mathbb{W}_s^{\langle b, \mathcal{F} \rangle} = W_s^b + \beta \sum_{s' \in \mathcal{S}} P^b(s, s') \mathbb{W}_{s'}^{\mathcal{F}}.$$

Era honetan, Whittle indizeak, sari marjinalaren, $r_s^{\mathcal{F}}$, eta lan marjinalaren, $w_s^{\mathcal{F}}$, arteko ratioa adierazten du, non sari (lan) marjinala s hasierako egoeran zerbitzatua izanaren eta ez zerbitzatua izanaren, eta ondoren \mathcal{F} politika erabilia, sari (lan) itzaropenen arteko diferentzia den.

Indize politikak eta indexabilitatea hainbat problema klaseetan erabili dira [Gittins'1979; Whittle'1988; NinoMora'2007]; dena den, problema guztiak ez dira indexableak. Whittle indizeen balioak kalkulatzeko eta indexabilitate baldintza nahikoak baieztatzeko algoritmo bat existitzen da [NinoMora'2007], *Adaptive-Greedy* deitua, *AG*-algoritmoa laburki. Problema bat indexablea baldin bada, orduan *AG*-algoritmoak

Whittle indizeak kalkulatu dituzte, zerbitzatu multzo optimoak kontuan hartuta. Jarraian algoritmo honen funtzionamendua erakusten da:

Algorithm 1 \mathcal{AG} -algoritmoa

```

1:  $\mathcal{F}_0 := \emptyset$ 
2: for  $i = 1 \rightarrow$  egoera kopurua do
3:    $s_i \in \arg \max\{v_s^{\mathcal{F}_{i-1}} : s \notin \mathcal{F}_{i-1}\}$ 
4:    $v_{s_i}^* = v_{s_i}^{\mathcal{F}_{i-1}}; \mathcal{F}_i = \mathcal{F}_{i-1} \cup \{s_i\}$ 
5: end for

```

Bestalde, [NinoMora'2007] lanean (2.6) problemarako indexabilitate baldintza nahikoak ondorioztatzen dira. Ikerlan horren arabera, (2.6) problema indexablea da ondorengo bi baldintzak betetzen badira:

- (i) $w_s^{\mathcal{F}}$ lan marjinala positiboa da $s \in S$ eta $\mathcal{F} \in \Pi$ guztientzat;
- (ii) $v_{s_i}^*$ kantitateak i -rekin ez gorakorrak dira.

Ohartu bigarren baldintza zuzenean egiazta daitekeela \mathcal{AG} -algoritmoa aplikatu ondoren.

Scheduling arloan Whittle indize ikuspegia erabiltzen duen lan aipagarrietakoa [Ayesta'2010] da, zeinetan denboran aldakorra den kanalean banaketa esponentziala duten fluxu tamaintzat batz besteko atzerapenarekiko emaitza onak ematen dituen Whittle-n oinarritutako heuristika proposatzen den.

3. Kapitulu

QoE-aren maximizaziorako eredu analitikoaren proposamena

Kapitulu honen helburua sare baliabideen esleipenean QoE-a maximizatzeko planifikazio problemarako eredu analitikoa proposatzea da. Horretarako, behin scheduling problema hori egokiro definituta 3.1 puntuan, horren QoE-aware MDP eredu proposatuko da 3.2 sekzioan. Ondoren, 3.3 atalean, proposatutako MDP eredu hori ebazteko politika optimoa lortzearen gaiari buruzko hausnarketa egiten da. Bukatzeko, kapitulu honen azken parteak, 3.4 atala, proposatutako QoE-aware eredu analitikoaren ezaugarri/ondorio nagusiak biltzen ditu.

3.1 Problemaren deskribapena

QoE-a maximizatzea helburutzat duen trafiko fluxuen scheduling problema aztertuko da. Transmisio une bakoitzean planifikatzaileak transmititzeko erabiltzaile fluxu bat aukeratzeko erabakiak hartuko ditu. Fluxu bakoitzak bere ausazko tamaina, X , du ezaugarri, hau da, transferitu beharreko guztirako bit kopurua. Fluxu tamaina horiek $\mathbb{E}[X] < \infty$ duten independenteki banatutako ausazko aldagaiak dira, non $F(x) = \mathbb{P}(X \leq x)$, $f(x)$ eta $h(x) = f(x)/(1 - F(x))$ dagokien banaketa funtzioa, dentsitate funtzioa eta *hazard* ratioa diren, hurrenez hurren. Bestetik, fluxu baten bit guztiak kanalerara transmititzeko beharrezko denborari fluxu atzerapena, d , deritzogu; bere balioa erabilitako scheduling algoritmoak zehaztuko du.

Gaur egungo aplikazio eta zerbitzuen heterogeneotasuna dela eta, fluxu kontzeptu generikoa erabiliko da, zeinak bukaerako erabiltzaileari elementu autonomo bezala aurkezten zaion datu-kantitateari erreferentzia egiten dion. Erabiltzaileen trafiko fluxuak bi taldetan sailka ditzakegu: fitxategien deskargarekin zerikusia duten fluxuak eta multimedia fluxuak. Fitxategien deskargarekin zerikusia dutenei dagokionez, web orria, e-maila, PDF dokumentuak, irudiak, audio edota bideo fitxategiak aurki ditzakegu besteen artean. Bestetik, multimedia fluxuen artean, adibidez, multimedia elementuak dituen web orria izan daiteke, bideo sekuentzia bat osatzen duten HTTP streaming-eko bideo segmentua edota irudien talde (GOP) bat.

Azkenengo urteetako ikerketa lanetan ere trafiko modelaketan fluxuen tamainarako banaketa esponenziala kontsideratu izan den arren [Ayesta-b'2011; Cecchi'2013], zeinak problemen modelaketa zein ebazpena errazten duen, tamaina esponenzialak erabiltzea errealitatek aldentzen da [Thompson'1997]. Tesi lan honetan **Pareto motako fluxu tamainetan arreta jarriko** da. Internet-eko trafikoaren fluxu tamainak Pareto banaketan bidez era egokiagoan modela daitezkeela [Reginald'2011] ezaguna da, zeinek trafiko horren portaera *self-similar*-a harrapatzen duten. Aztertuko den Pareto funtzioak $\alpha > 1$ forma parametroa eta $\gamma > 0$ eskala parametroa ditu, eta bere dentsitate funtzioa horrela definitzen da $x \geq 0$ guztientzat:

$$f(x) = \frac{\gamma^\alpha}{(1 + \gamma x)^{\alpha+1}} \quad (3.1)$$

Banaketa esponenzialen memoria gabeko propietatea dela eta, banaketa horientzat *hazard* ratioaren eskuratutako zerbitzuarekiko dependentzia desagertzen da. Pareto banaketak, berriz, *hazard* ratio beherakor klasearen barnekoak dira [Aalto'2008], zeinean *hazard* ratioa beherakorra den eskuratutako zerbitzuarekiko; hau da, eskuratutako zerbitzua txikiagoa den heinean fluxuaren transmisioa bukatzeko probabilitatea altuagoa da.

Bestalde, QoE-a kuantifikatzeko helburuarekin, kalitate metrika objektiboa den atzerapen horren eragina metrika subjektibo baten bihurtzea interesatzen zaigu. Esate baterako, [Krishnan'2012] lanak Internet bideo buffering-en atzerapen tolerantzia aztertzen du, eta erabiltzaileek bideoaren deskarga bertan behera uzteko atalasea 2 segundotan ezartzen du. Hortaz, 2 segundotako denboran GOP bat deskargatu behar da. Bestetik, adibidez, [Ibarrola'2009] esperimentuak web nabigazio zerbitzurako web orri baten deskarga denborak erabiltzailearen pertzepzioan duen eragina aztertzen du.

Lan honetan egungo sareetan distortsio kausa nagusia atzerapena izateari arreta ematen zaio, paketeen galera tasa bezalako beste metrikak kontuan hartu gabe. Gaur egun, trafiko gehiena TCP-n oinarritzen da, zeinak paketeen berreskuratze mekanismoa inplementatzen duen. Hala ere, TCP-n oinarritutako multimedia zerbitzuetan esate baterako, galeren eragile nagusia denboraz kanpo heldutako paketeen kopurua da. Honela, modu orokorrean, atzerapenak gidatutako QoE-aware scheduling eskema egokia proportzionatzea hobe da, non proposamenaren aplikazio zehatza ingeniarietza eremuaren arabera izango den.

Erabiltzailearen asebetetzea batz besteko iritzi kalifikazio (MOS) metrikaren bidez [ITU-T'2003; Fiedler'2010] ebaluatzen da eskuarki, zeina ahots kalitatea balioztatzeko proposatu zen jatorrian. 3.1 Taulan erakusten den bezala, metrika hori 1etik (kalitate oso eskasa) 5erako (kalitate bikaina) eskalan ebaluatzen da.

MOS	Erabiltzailearen asebetetzea
5	Bikain
4	Ondo
3	Onargarri
2	Txar
1	Oso txar

3.1 Taula: MOS-aren eta erabiltzailearen asebetetzearen arteko erlazioa.

Era honetan, **erabiltzaile bakoitzeko QoE-a kuantifikatzen duen atzerapenaren menpekora den MOS utilitate funtzioa kontsideratuko** dugu. Utilitate funtzio hori ikasketa kasu espezifikora doitu behar den arren, adierazpen generikoa erabiliko da, zeinak agertoki ezberdinetan erabiltzaileen benetako pertzepzioa jasoko duen. Modu honetan, **funtzio horretan hiru tarte** bereiz ditzakegu [Richards'1998]:

- **Kalitate maximoko atala**^[1]: Atzerapen atalase bat baino lehen erabiltzaile gehienek ez dute errendimendu hobekuntzarik nabaritzen hautemandako kalitateari dagokionez. Beraz, atzerapen balio baxu baten azpitik, d_{\min} , funtzio horrek bere balio maximoa du eta konstante mantentzen da, degradaziorik jasaten ez delarik.

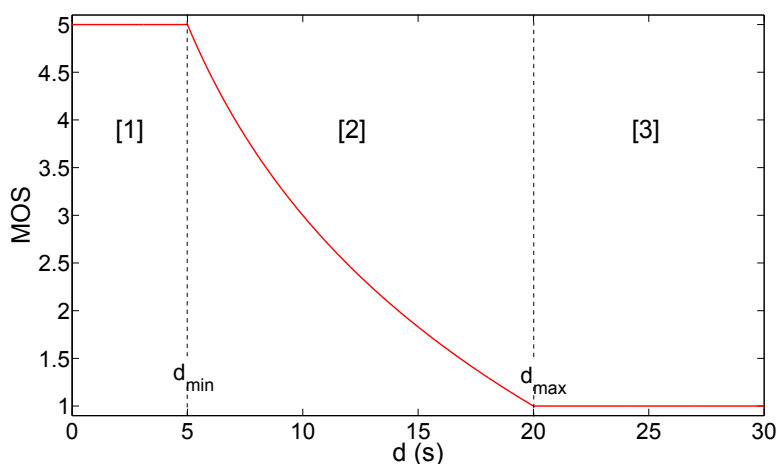
- **Zerbitzu jasanezinako atala**^[3]: Atzerapen balio altu baten gainera, d_{max} , zerbitzua jasanezina kontsideratzen da, zeinak 1 balioa duen MOS-a ematen duen. Hortaz, behin atzerapen hori iritsita, erabiltzaile hori zerbitzatzeko ezegokia da.
- **QoE-aren degradazio tartea**^[2]: d_{min} hasierako degradazio puntua da, eta atzerapenaren goi limite bat arte, d_{max} , kalitatea degradatzen da. Sare errendimendu parametroak erabiltzailearen gogobetetzera mapeatzea helburutzat duten hautesmandako kalitateari buruzko azterlan gehienek forma logaritmikoa duen MOS utilitate funtzioa erabiltzen dute QoE-aren degradazioa ebaluatzeko [Reichl'2011]. Hori kontuan hartuta, atzerapenaren menpekora den MOS-a funtzio logaritmiko baten bidez (3.2) hurbiltzen da tarte horretan:

$$MOS = c_1 - c_2 \cdot \log(d) \quad (3.2)$$

non c_1 eta c_2 koefizienteek zerbitzu motarekin, sare motarekin eta erabiltzaileak zerbitzu horretan duen iaioitasunarekin edota exijentziarekin zerikusia duten.

Arestian aipatutako MOS funtzioaren adierazpena (3.3) formulaz jasotzen da, eta atzerapenaren menpekora den MOS utilitate funtzio baten adibidea grafikoki adierazten da 3.1 Irudian.

$$MOS = \begin{cases} 5 & d \leq d_{min} \\ c_1 - c_2 \cdot \log(d) & d_{min} \leq d \leq d_{max} \\ 1 & d \geq d_{max} \end{cases} \quad (3.3)$$



3.1 Irudia: MOS vs. atzerapen adibidea.

Orain arte, erabiltzaile bakarraren kalitate subjektiboa atzerapenak mugatutako MOS utilitate funtzio baten bidez adierazi da. Emaizta horiek baliabideen partekatze planifikazio problema QoE-aren maximizatze eremuan partikularitzeko erabiliko dira. Era honetan, **bataz besteko MOS-a, $\mathbb{E}[\text{MOS}]$, maximizatzea helburutzat duen baliabide esleipen eskema kontsideratuko** dugu. Orduan, optimizazio problema horretarako funtzio objektiboa horrela adierazten da:

$$\mathbb{E}[\text{MOS}] = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \text{MOS}_k(d_k) \quad (3.4)$$

non K guztirako erabiltzaile kopurua sisteman den, d_k k erabiltzailearen atzerapena eta MOS_k d_k -k eragindako k erabiltzailearen QoE metrika izanik, (3.3) formularen bidez kalkulatu dena.

Beraz, scheduler-aren xedea ondorengo optimizazio problema ebatzen duen π politika bat aurkitzea da:

$$\max_{\pi} \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \text{MOS}_k(d_k) \quad (3.5)$$

Laburki, atal honetan deskribatutako **scheduling problemaren ezaugarri nagusiak** honako hauek dira:

- Erabiltzailearen **QoE-aren modelaketarako atzerapenaren menpekoa den MOS utilitate funtzioa** (3.3) erabiltzen da.
- Planifikazioaren **helburua bataz besteko QoE-a maximizatzea** (3.5) da.
- **Pareto banaketa** (3.1) jarraitzen duten fluxu tamainak kontsideratzen dira.

Hurrengo atalean, planifikazio problemaren ezaugarri horiek kontuan hartuta, QoE-aware problema hori MDP markoan modelatuko da.

3.2 QoE-aware MDP ereduaren proposamena

Atal honetan 3.1 sekzioan aurkeztutako batz besteko MOS-a maximizatzea helburutzat duen optimizazio problema MDP baten bidez modelatuko da. Orduan, transmisio tarte bakoitzean zein erabiltzaile transmititu erabakitze MDP bat erabiliko da, zeinaren bukaerako xedea batz besteko MOS-a maximizatzea den.

Era honetan, MDP-aren eboluzioak QoE-a maximizatzea helburutzat duen $\pi \in \Pi$ scheduling politika zehaztuko du. 3.1 atalean identifikatutako scheduling problemaren ezaugarrien arabera, Π onargarriak diren politiken multzoak ondorengo propietateak bete behar ditu:

- *QoE-awareness*-a: Erabiltzailearen kalitate subjektiboa karakterizatzen duen atzerapenaren menpekota den MOS funtzioa ezaguna da.
- Atzerapenaren menpekotasuna: Fluxu batek sisteman daraman denbora, d , jakina da.
- Aurreratu gabetasuna (non-anticipation): Fluxu tamaina ezezaguna da, eta eskuratutako zerbitzua, a , erabiltzen da tamaina informazio bezala. Horrez gain, tamaina banaketa funtzioa ezaguna da.

Horiekin batera, zerbitzu diziplinari dagokionez honako ezaugarriak kontenplazten dira:

- Desokupazioa (*preemption*): Desokupazioa onartzen duen transmisio lan modua kontsideratuko da, transmititzen ari den erabiltzaile baten zerbitzua eteteko aukera emanaz, erabiltzaile horrek transmititzeko datu gehiago izan arren. Lehentasun altuagoko erabiltzaileek lehentasun baxuagokoak desalojatzen dituzte.
- Zerbitzu unitarioa: Transmisio une bakoitzean erabiltzaile bakarra aukeratuko da transmisiorako.

Bestalde, MDP baten sariaren definizioari dagokionez, sariaren maximizazio, edo honen problema baliokidea den kostu minimizazio (sariak kostu negatiboak izanik), estrategia tradizionaletan sari metatuak erabiltzen dira [VanMieghem'1995]. Sari metatu ikuspegiaren arabera, erabakitze une bakoitzean erabiltzaile bakoitzak akzio eta egoeraren menpekota den saria irabazten du, zeinak bukaerako guztirako sari agregatuan zenbatzen duen. Esate baterako, batz besteko atzerapenaren minimizaziorako problematik, sisteman geratzeko kostu unitario itxaropenak batzen dira denboran zehar, batz besteko kostua minimizatze helburuarekin. Hala ere, batz besteko MOS-aren maximizazio problemarako sari horiek nola definitu erronkaria da. Izan ere, (3.5) opti-

zazio problemaren formulazioan ikus daitekeenez, maximizatu nahi den funtzio objektiboa erabiltzaile guztien MOS funtzioen batura da. **Erabiltzailearen kalitate subjektiboaren ikuspuntutik, atzerapenaren menpekoa den funtzio horrek erabiltzailearen fluxu transmisioa osorik bukatzen denean zentzua du soilik.** Hau da, MOS funtzioa ez da metatua denboran zehar, eta **beraz, saria fluxu osoa transmititua izan denean ematea zentzuzkoa da soilik.**

Gainera, esan beharra dago gure ereduaren sariaren ahultzea inplizituki gertatzen dela, denboraren edota atzerapenaren menpekoa den tarte baten logaritmikoki degradatzen den utilitate funtzioa erabiltzen baita. Era honetan, eredu tipikoek denboran zehar sariaren degradazio esponentziala maneiatzen badute ere, gure modelaketan deskonturik gabeko kasua, $\beta = 1$, erabiliko da, degradazio denboralak MOS funtzioak eraginez.

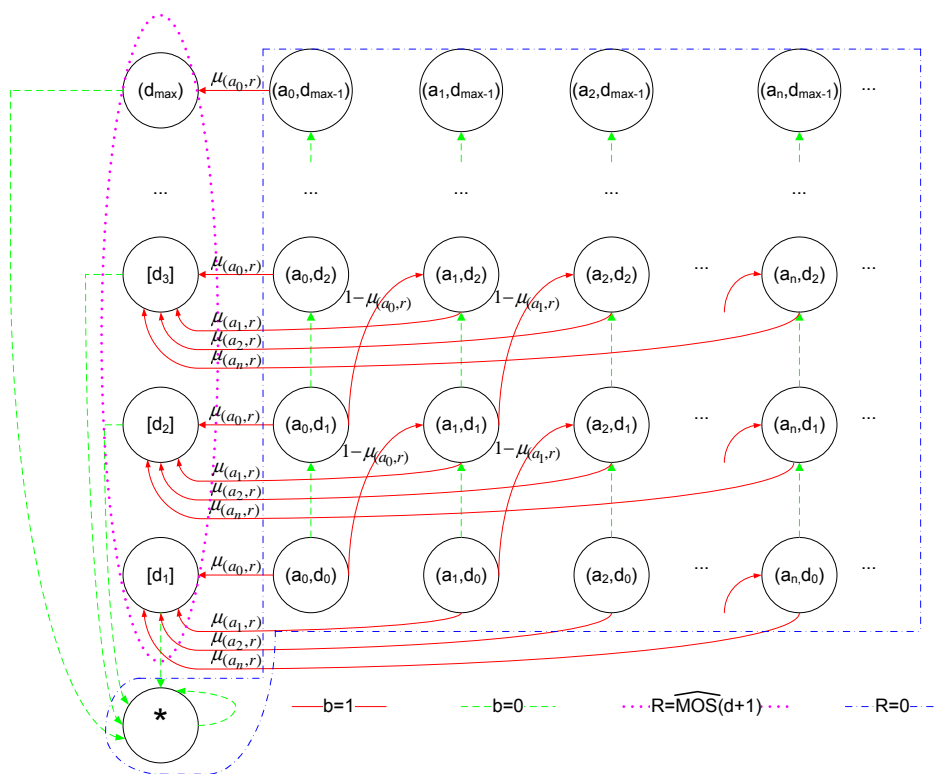
Orduan, baliabideen planifikazio QoE-aware-erako MDP-ari lotutako (3.5) optimizazio problema horrela idatz daiteke:

$$\max_{\pi \in \Pi} \mathbb{E}_0^\pi \left[\sum_{t=0}^{\infty} \sum_{k \in \mathcal{K}} R_{k, (a_k(t), d_k(t))}^{b_k(t)} \right] \quad \sum_{k \in \mathcal{K}} b_k(t) = 1 \quad \forall t \quad (3.6)$$

Ondorengo azpi-ataletan berriki azaldutako QoE-aware den scheduling problema-rako MDP ereduaren elementuak deskribatuko dira. Horretarako, k erabiltzaile baten akzio-espazioa, egoerak, egoeren trantsizio-probabilitateak eta sariak definitzen dira. Horretaz gain, 3.2 Irudiak gai horiek guztiak laburbildu eta erlazionatzen ditu, zeinak definitutako QoE-aware MDP ereduaren erabiltzaile bakoitzaren egoera diagrama adierazten duen.

3.2.1 Akzio-espazioaren definizioa

k erabiltzaile bakoitzari zero edo banda zabaleraren kapazitate osoa esleitu ahal zaio, zeinak $\mathcal{B} := \{0, 1\}$ akzio-espazio bitarra eragiten duen erabiltzaile bakoitzeko. k erabiltzaile baten akzioa, b_k , 1 baldin bada, erabiltzaile hau aukeratuko da transmisiorako; bestela, $b_k = 0$ bada ez da k erabiltzailearen bitarik transmitituko kanalera. Demagun kanal kapazitatea konstantea dela; $b_k = 1$ denean k fluxuko r bit transmititzen dira kanalera transmisio une bakoitzean.



3.2 Irudia: Erabiltzaile baten QoE-aware egoera diagrama.

3.2.2 Egoera-espazioaren definizioa

Erabiltzaile bakoitzaren egoera-espazioko egoerak hiru taldetan sailka ditzakegu: bukatugabeko egoerak, sari egoerak eta amaierako egoera.

Fluxu transmisioa bukatu gabe dagoen egoera guztiak bukatugabeko egoera taldeari dagozkio. Bukatugabeko egoera batek bi osagai ditu:

- Eskuratutako zerbitzua, $a \in \mathcal{A}$, bitetan, eta
- sisteman igarotako denbora edota atzerapena, $d \in \mathcal{D}$, segundotan.

Era horretan, erabiltzaile bat (a_i, d_j) egoeran baldin badago $i \cdot r$ bit transmititu ditu kanalera eta j denbora-tarte darama sisteman. Era honetan, eskuratutako zerbitzu maila horiei dagozkien eskuratutako zerbitzuak r transmisio tasaren multiploak dira, hala nola atzerapen maila horiei dagokien atzerapenak transmisio periodoaren multiploak. Gainera, edozein erabiltzailearen hasierako egoera $(0, 0)$ da.

Bestalde, $[d_j]$ sari egoerak definitzen dira, zeinetan QoE-ak gidatutako saria ematen den. Egoera horiek atzerapenaren menpekoak dira soilik, eta horietara fluxuaren

transmisioa bukatutakoan irits daiteke soilik.

Bukatzeko, egoera-katea $[*]$ amaierako egoera xurgatzailean bukatzen da.

3.2.3 Egoera trantsizio-probabilitateen definizioa

Edozein MDP eredu bezalaxe, proposatutako QoE-aware ereduak ausaz eboluzionatu-ko du egoera trantsizio-probabilitateen arabera, zeinaren bilakaera erabakitako akzioa- ren hala nola sistema beraren zorizko portaeraren menpekoa den. k erabiltzailearen une bateko egoera trantsizio-probabilitateak halaxe definitzen dira:

- Erabiltzaile bat transmititzeko aukeratzen baldin bada dagokion sari egoerara mugituko da $\mu_{(a,r)}$ bukatzeko probabilitatearekin:

$$p_k^1((a, d), ([d + 1])) = \mathbb{P}(a < X_k \leq a + r | X_k > a) = \mu_{(a,r)}$$

- Transmititzeko aukeratutako fluxuak sisteman jarraituko du segituan adierazten den bezalaxe:

$$p_k^1((a, d), (a + r, d + 1)) = 1 - \mathbb{P}(a < X_k \leq a + r | X_k > a) = 1 - \mu_{(a,r)}$$

- Transmisiorik gertatu ez arren atzerapen maila bat altuagoa duen egoera baterako trantsizioa gertatuko da:

$$p_k^0((a, d), (a, d + 1)) = 1$$

Hortaz, atzerapenaren egoera-osagaiaren eboluzioa aztertzen bada, fluxuaren transmisioa osorik bukatu arteko erabaki une bakoitzean, transmititzeko aukeratua izatearen independenteki, bere balioa inkrementatu egiten da, egoera aldatzen delarik. Modu honetan, MDP eredu berri honek **restless izatea du ezaugarri**.

- Sari egoera batetik zuzenean bukaerako egoerara pasatzen da:

$$p_k^0([d], ([*])) = 1$$

- Behin bukaerako egoerara iritsita, sistemak egoera horretan jarraitzen du:

$$p_k^0([*], ([*])) = 1$$

3.2.4 Sarien definizioa

QoE-aware den utilitate funtzioa maximizatzeko helburuarekin, zeina bukatutako transmisio baten fluxu atzerapenaren menpekoa den, ondorengo sari egestura kontsideratzen da:

- Bukatugabeko egoeratan ez da saririk ematen:

$$R_{k,(a,d)}^b = 0$$

- Fluxu transmisioa bukatzen baldin bada, sari egoeran QoE-aren utilitatean oinarritutako saria ematen da, atzerapenaren menpekoa dena:

$$R_{k,[d]}^b = U(d+1) = \widehat{\text{MOS}}(d+1)$$

non $\widehat{\text{MOS}}$ MOS normalizatua den $[0, 1]$ tartean.

- Bukaerako egoeran ez da saririk ematen:

$$R_{k,[*]}^b = 0$$

Beraz, atzerapenaren menpekoa den QoE-aware saria behin fluxu transmisioa bukatutakoan ematen da soilik.

3.3 Soluzio optimoaren analisisa

Behin QoE-aware MDP proposamena definituta, atal honetan eredu horren soluzio optimoa eskuratzearen inguruko gogoeta egingo da. Alde batetik, orokorrean QoE-aware MDP horren ebazpen zehatza lortzearen ezintasunari buruzko gaia tratatuko da. Bestaldetik, konfigurazio errealistentzat emaitza optimoa lortzea posible ez den arren, agertoki murriztu batean soluzio optimoa aztertuko da, zeinak tribiala ez den politika optimoaren estruktura ezagutzea ahalbidetuko digun.

Nahiz eta teorikoki MDP guztiak era optimoan ebatz daitezkeen, jarraian erakutsiko den bezala, proposatutako MDP ereduaren soluzio optimoaren konputazio numerikoa orokorrean ez da bideragarria dimentsionamendu maldizioa dela eta. Gainera, ohar-tu beharra dago sistemaren egoera bat erabiltzaile guztien egoeraz osatutako multzo-egoera dela. Horrez gain, scheduler-aren ikuspuntutik, hartutako akzioa transmisiorako aukeratutako erabiltzailearekin bat dator. Hau da, sisteman N erabiltzaile badaude, planifikatzailearentzat N akzio posible dira.

Jar dezagun adibide bat gure ereduaren egoeren konbinazio kopuru izugarria frogatzeko. Demagun bi erabiltzaile soilik daudela sisteman, zeinen batz besteko fluxu tamaina 10 Mbit den. 10 Mbps-ko kanal kapazitatea eta 1 ms-ko transmisio unea kontsideratuz, $r = 10$ Kbit da. Batetik, eskuratutako zerbitzuaren goi limitetzat batz besteko tamaina hartuta, 10^3 eskuratutako zerbitzu maila beharko lirake. Bestetik, d_{max} 1 s dela kontsideratzen badugu, orduan 10^3 atzerapen maila posible dira. Beraz, bukatugabeko egoerak bakarrik kontuan hartuta egoera-espazioaren tamaina $10^3 \cdot 10^3 \cdot 10^3 \cdot 10^3$ izango litzateke, guztira bilioi bat egoera baino gehiago, egungo ahalmen teknologikoa gaingitzen duena.

Bestalde, kasu praktiko eta errealetan soluzio optimoa orokorrean eskuragarria ez den arren, ez errealista eta espazialki murriztutako problemen soluzio optimoa aztertzek politikak optimoaren ezaugarri estrukturalak aurkitzen lagun dezake. MDP-aren bukatugabeko egoerak eskuratutako zerbitzuaren zein atzerapenaren menpekoak izanda, politika optimo hori eskuratutako zerbitzuaren menpekoa soilik (Gittins klasikoa adibidez, DHR motako fluxuentzat eskuratutako zerbitzu baxuena duen erabiltzaileari lehentasuna emanez), atzerapenaren menpekoa soilik (esate baterako, sisteman denbora gutxien edo gehien daraman erabiltzailea lehenetsiz) edo bien konbinazioaren menpekoa den ez da tribiala. Era honetan, adibide bezala, 2 erabiltzaile, 9 atzerapen maila eta 9 eskuratutako zerbitzu maila dituen agertoki murriztua kontsideratuko dugu, eta QoE-aware MDP ereduaren soluzio optimoa lortu da balio-iterazio metodoa erabiliz. Bi erabiltzaile horiek MOS eta tamainen banaketari dagokionez ezaugarri berdinak dituzte (ikus 3.2 Taula).

d maila	MOS	a maila	μ
0	1	0	0.9230
1	1	1	0.6630
2	0.6667	2	0.5037
3	0.4717	3	0.4042
4	0.3333	4	0.3370
5	0.2260	5	0.2887
6	0.1383	6	0.2525
7	0.0642	7	0.2243
8	0	8	0.2018

3.2 Taula: Erabiltzaileen QoE eta tamaina ezaugarriak.

Jarraian, bi erabiltzaileek bukatu ez dutela suposatuz egoeren sekuentzia bi kasu aztertuko dira. Lehenengo kasuan, bi erabiltzaileak une berean heltzen dira sistemara, hau da, atzerapen maila berdina dute. 3.3 Taulan beha daitekeenez, eskuratutako zerbitzu baxuena duen erabiltzailea aukeratzen da; berdinketa dagoenean edota $\widehat{MOS}(d+1)$ nulua denean, lehenengo erabiltzailea hautatzen da. Bigarren kasuan, berriz, lehenengo erabiltzailea sisteman denbora gehiago daramala suposatzen da, eta emaitzak 3.4 Taulan biltzen dira. Hasieran sisteman denboran gutxiago daraman erabiltzailea zerbitzatzen da, baina ondoren beste erabiltzailea ere zerbitzatzen da, tamainaren efektua ere kontuan hartzen delarik.

a_1	a_2	d_1	d_2	b
0	0	0	0	1
1	0	1	1	2
1	1	2	2	1
2	1	3	3	2
2	2	4	4	1
3	2	5	5	2
3	3	6	6	1
4	3	7	7	1
5	3	8	8	1

3.3 Taula: Atzerapen berdinerako politika optimoa.

a_1	a_2	d_1	d_2	b
0	0	1	0	2
0	1	2	1	2
0	2	3	2	1
1	2	4	3	1
2	2	5	4	2
2	3	6	5	2
2	4	7	6	2
2	5	8	7	1
3	5	8	8	1

3.4 Taula: Atzerapen ezberdinerako politika optimoa.

Ondorio bezala, **soluzio optimoak bai eskuratutako zerbitzua bai atzerapena kontuan hartzen duela** esan genezake. Gainera, alde batetik, tamainari dagokionez, DHR motako Pareto banaketa kasurako, eskuratutako zerbitzu baxuena duten fluxuei lehenetasuna ematen zaie. Beste alde batetik, atzerapenari erreferentzia eginez, sisteman denbora gutxien daramaten erabiltzaileak lehenesten dira. Hortaz, **politika optimoak fluxu laburrei lehenetasuna ematearen eta sisteman denbora gutxiago daramaten fluxuak**

lehenestearen arteko konpromisoa bilatzen du.

Hala ere, lortutako emaitzak agertoki praktikoagoetara estropolatzea edota matematikoki politika azpi-optimoa eskuratzea ez da ataza erraza. Beraz, QoE-aware MDP ereduaren ebazpenari soluzioa emateko matematikoki eta konputazionalki tratagarria den hurbilketa proposatzearen beharra agerian geratzen da.

3.4 Ondorioak

Kapitulu honetan baliabideen esleipen QoE-aware-erako eredu analitiko proposamena deskribatu da.

Proposatutako ereduak kanal partekatuan fluxuen planifikazioan QoE maximizazio problema modelatzen du. Horretarako, QoE-an oinarritutako optimizazio problema egokiro formulatzen da MDP baten bidez, zeinak erabakiak hartzeko prozesuan QoE-awareness-a sartzen duen, erabiltzailearen asebetetzea modelatzen duen atzerapenaren menpekoa den MOS utilitate funtzioa erabiliz. Proposatutako QoE-aware MDP ereduaren ezaugarri nagusia sariak definitzeko modua da, zeinetan atzerapenaren menpekoak diren MOS sari ez nuluak fluxuaren transmisio osoa bukatutakoan soilik ematen diren, erabiltzailearen benetako pertzepzioa eskuratuz. Horrez gain, proposatutako ereduaren restless ezaugarria azpimarratzekoa da, zeinetan akzioaren independenteki egoeraldaketak eman daitezkeen denboran zeharreko egoera-osagai den atzerapenaren gehikuntzaren ondorioz. Gainera, problemaren definizioan Pareto tamaina banaketa erabiltzea zehaztu izanik, erabiltzaile bati dagokion MDP egoeraren osagaitzat eskuratutako zerbitzua ere kontenplatu da.

Beraz, emaitza hauek baliabideen esleipenean kalitate subjektiboa sartzearen inguruan aurrera pausu analitikoa islatzen dute, proposatutako QoE-aware MDP eredu hori hautemandako kalitatearen maximizazioa helburutzat duten planifikazio problema konplexuagoak modelatzeko oinarria izanik.

Bestalde, proposatutako MDP ereduaren ebazpenaren soluzio optimoa bai eskuratutako zerbitzuaren bai atzerapenaren menpekoa dela egiaztatu da, fluxu laburrak lehenestearen eta sisteman denbora gutxiago daramaten fluxuei lehentasuna ematearen arteko konpromisoa bilatzen duelarik.

Hala ere, lortutako ereduaren ebazpen optimorako orokorrean beharrezkoak diren egundoko konputazio betekizunak direla eta, hau ezin da analitikoki ezta konputazionalki ebatzi oro har. Horrek soluzio hurbilduak inferitzera motibatzen gaitu, hurrengo kapituluan aztertuko dena.

4. Kapitulu

QoE-aren maximizaziorako indize erregelaren proposamena kanal konstantean

Kapitulu honetan matematikoki eta konputazionalki tratagarriak diren QoE-aware indize erregelak proposatzeari ekingo zaio, kanal kapazitatea konstantea denerako hain zuzen ere. Horretarako, aurreko kapituluan proposatutako QoE-aware MDP ereduaren ebazpenerako Gittins zein Whittle metodoak erabilia indize erregela motako soluzio hurbildua definituko da.

Lehenik eta behin, Gittins metodoaren bidez QoE-aware indize erregela lortuko da 4.1 sekzioan. Ondoren, 4.2 atalean, Whittle metodoaren bidezko ebazpena erabilia dagoen QoE-aware Whittle indize politika definituko da. Bi metodo horiek erabilia lortutako QoE-aware indize erregelak baliokideak direla ondorioztatzen da.

4.1 Gittins-en oinarritutako QoE-aware indize erregelaren proposamena

Gittins indizearen definizioari jarraituta, (2.4), eta proposatutako QoE-aware MDP eredu erabilia, QoE-ak gidatutako Gittins-en oinarritutako indize erregela ondorioztatu da oraingoan. Heuristika horri Gittins MOS deituko diogu, GM laburki.

Indize hori erabiltzaile batentzat kalkulatzen da gainontzeko erabiltzaileen independenteki. Era honetan, hemendik aurrera k erabiltzaile bati dagokion azpi-indize guztiak kenduko ditugu, lortutako emaitza erabiltzaile bati dagokiolarik. GM erregela hori ez da eskuratutako zerbitzuaren menpekoea soilik izango, baizik eta atzerapenaren menpekoea ere. Modu honetan, $J_{\text{MOS}}(a, d, \tau)$ efizientzia funtzioa Gittins-en teoria atzerapenaren menpekoea den QoE-aware scheduling estrategiara aplikatzearen emaitza da. Beraz, GM indizea horrela adierazten da formalki:

$$\text{GM}(a, d) = \sup_{\tau \geq 1} J_{\text{MOS}}(a, d, \tau) = \sup_{\tau \geq 1} \frac{\mathbb{E}_0 \left[\sum_{j=0}^{\tau-1} R^1(a(j), d(j)) \right]}{\mathbb{E}_0 \left[\sum_{j=0}^{\tau-1} 1 \right]} \quad (4.1)$$

Ohartu deskonturik gabeko sarien kasua kontsideratzen dela.

Bestetik, 3.2.4 puntuan emandako definizioen arabera, sari ez-nulu bakarria fluxuaren transmisioa bukatutakoan gertatuko da. Hortaz, irabazitako guztirako sari itxaropenean eragina izango duen sari bakarria fluxua bukatzen bada τ azken transmisio unearen ostean jasotakoa izango da. Orduan, sariaren definizio hori ordezkatzuz eta bukatzeko probabilitatearen definizioa aplikatuz, zenbakitzailea hauxe da:

$$\begin{aligned} & \mu_{(a+r \cdot (\tau-1), r)} \cdot R^1(d + \tau) \\ = & \mathbb{P}(a + r \cdot (\tau - 1) < X \leq a + r \cdot \tau | X > a + r \cdot (\tau - 1)) \cdot \widehat{\text{MOS}}(d + \tau) \\ = & \frac{\mathbb{P}(a + r \cdot (\tau - 1) < X \leq a + r \cdot \tau) \cdot \widehat{\text{MOS}}(d + \tau)}{\mathbb{P}(X > a + r \cdot (\tau - 1))} \end{aligned} \quad (4.2)$$

Bestaldetik, Gittins-en formulazio orokorrean bezalaxe, $\beta = 1$ denerako izendatzai-lean sisteman jarraitzeko probabilitate itxaropen metatua daukagu:

$$\sum_{j=0}^{\tau-1} \left[\frac{\mathbb{P}(X > a + r \cdot j)}{\mathbb{P}(X > a)} \right] \quad (4.3)$$

4.1 Proposizioa. (4.1) eta (4.2) adierazpenak (4.3) espresioan ordezkaturik GM indizea horrela formula daiteke:

$$GM(a, d) = \sup_{\tau \geq 1} \frac{\mathbb{P}(a + r \cdot (\tau - 1) < X \leq a + r \cdot \tau) \cdot \widehat{MOS}(d + \tau)}{\mathbb{P}(X > a + r \cdot (\tau - 1)) \cdot \sum_{j=0}^{\tau-1} \left[\frac{\mathbb{P}(X > a + r \cdot j)}{\mathbb{P}(X > a)} \right]} \quad (4.4)$$

(4.4) adierazpena aztertzen badugu GM indize hori atzerapenaren menpekoa den MOS utilitate funtzioaren, eskuratutako zerbitzuaren menpekoak diren probabilitateen, kanal kapazitatearen eta τ -ren menpekoa dela erraza da ikustea. Kanal kapazitatea hala nola MOS utilitate funtzioa ezagunak dira scheduler-arentzat. Honetaz gain, eskuratutako zerbitzuaren menpekoak diren probabilitate horien kalkulurako fluxu tamainaren banaketa beharrezkoa da; gure ikerketa (3.1) Pareto funtzioetan zentratuko da.

Bestalde, efizientzia funtzioa maximizatzen duen erabiltzaile bati jarraian esleituko zaizkion transmisio une kopuru optimoa, τ^* , aztertzeaz dagoen alderdi nabarmena da. Honela, segidan τ^* numerikoki aurkituko da. 4.1 Irudian τ balio desberdinentzat GM-en efizientzia funtzioa adierazten da egoera desberdinetan dauden fluxuen tamainak Pareto banaketa jarraitzen duen bi erabiltzaile desberdinentzat. Grafikoki beha daitekeenez, Pareto fluxu tamaintzat J_{MOS} beherakorra da τ -rekin. Beraz, $\tau^* = 1$ dela ondoriozta dezakegu. Emaitza hori hazard ratio beherakorra duten banaketa guztientzat orokortu daiteke.

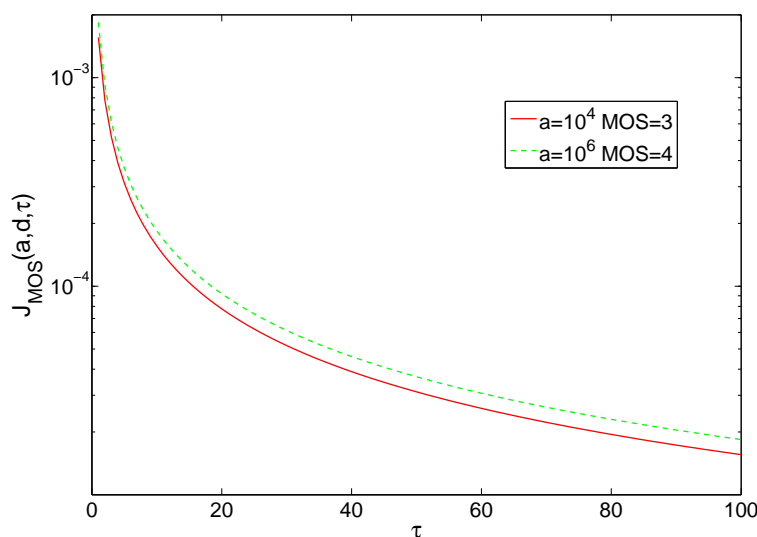
Ondorioz, Pareto fluxu tamaintzat GM indize erresultantea ondorengora sinplifikatzen da:

$$GM(a, d) = \frac{\mathbb{P}(a < X \leq a + r) \cdot \widehat{MOS}(d + 1)}{\mathbb{P}(X > a)} \quad (4.5)$$

4.1 Definizioa. Pareto tamaina banaketa duten fluxuentzako GM indizea (4.6) da:

$$GM(a, d) = \mu_{(a,r)} \cdot \widehat{MOS}(d + 1) \quad (4.6)$$

Azkenik, **GM indizea uneko bukatzeko probabilitatearen eta MOS funtzio normalizatuaren arteko biderkadura da**, bukatzeko probabilitatea eskuratutako zerbitzua-

4.1 Irudia: GM-en efizientzia funtzioa vs. τ .

ren menpekoa izanik, eta MOS funtzioa, berriz, atzerapenaren menpekoa. Era honetan, lortutako indize erregela estatistikoki bukatzeko gertuago dauden fluxuei lehentasuna ematen saiatzen da, QoE degradazio gehiegirik jasaten ez duten horiekin konbinatuz. Ohartu Pareto banaketaren hazard ratio beherakorraren ezaugarria dela eta, zeinak eskuratutako zerbitzua baxuagoa den heinean bukatzeko probabilitatea handitzen den, fluxu laburrei lehentasuna emango zaiela.

Bestalde, 3.1 atalean definitutako atzerapenaren menpekoa den MOS utilitate funtzioaren arabera, GM indizearen atzerapenaren menpekotasuna aztertzen baldin bada honakoa beha daiteke:

- d_{\min} -en azpitik, non MOS-a maximoa eta konstantea den ($\widehat{\text{MOS}} = 1$ izanik), tamainan oinarritutako politika bat baino ez da.
- d_{\max} -en gainetik MOS normalizatua zero da, $\text{GM} = 0$ izatea eraginez, eta hortaz, tarte honetan dauden erabiltzaileei lehentasun minimoa emango zaie.
- d_{\min} eta d_{\max} -en artean QoE-aware eta tamainan oinarritutako politika bat da.

Beraz, **GM indize erregelak fluxu laburrak faboratzearen eta sisteman denbora gutxiago daramatenen arteko konpromisoa bilatzen du**, fluxuen bukaera QoE onarekin lortu nahian. Hortaz, eskuratutako diziplina 3.3 atalean **politika optimoaren** inguruan ondorioztatutako **ezaugarriekin koherentea** da, optimoak ere konpromiso hori bilatzen baitu. Gainera, bere adierazpen matematikoaren sinpletasuna dela eta era

errazean eta efizientean inplementa eta exekuta daiteke edozein scheduler-en logikaren barruan. Ondorioz, atal honetan **QoE-aware-a den indize erregela sinplea, koherentea eta tratagarria** lortu dela esan genezake.

4.2 Whittle-n oinarritutako QoE-aware indize erregelaren proposamena

Aurreko atalean gure QoE-aware eredu proposamenaren ebazpenerako Gittins-en metodologia erabili bada ere, horren ebazpenerako Whittle-en ikuspegia printzipioz proposagoa izan daitekeela esan genezake. Horren arrazoia QoE-aware MDP ereduaren restless ezaugarria da, zeinetan erabaki une bakoitzean edozein akziorako egoera aldaketa dagoen atzerapenaren gehikuntzaren ondorioz. Era honetan, parte honetan restless ezaugarri hori kontuan hartuko duen Whittle-n metodoa erabilia QoE-aren optimizazio problemarako heuristika bat proposatuko da, Whittle MOS deituko duguna, WM laburki. Ondoren lortutako emaitza GM-ekin alderatuko da.

QoE-aren maximizazioa helburutzat duen optimizazio problemaren (3.6) formulazioari 2.2.2 atalean aipatutako Whittle-n sinplifikazioa [Whittle'1988] eta Lagrangiar metodoak [Visweswaran'2009] aplikatu ostean, QoE-aware problema hori horrelaxe formula daiteke:

$$\max_{\mathcal{F} \subseteq S_k} \mathbb{R}_{k,(a,d)}^{\mathcal{F}} - v \mathbb{W}_{k,(a,d)}^{\mathcal{F}} \quad (4.7)$$

$(a, d) \in \mathcal{F}$ egoerak egoera aktiboak direla deritzogu, zeinetan transmititzea edota beste era batean esanda lan egitea komenigarria den, eta $(a, d) \notin \mathcal{F}$ egoerak, ostera, pasiboak, zeinetan k erabiltzailea ez zerbitzatzea erabakitzen den.

4.1 Konjektura. (4.7) problema indexablea da.

Era honetan, 4.1 Konjektura onartuz, Whittle indizearen definizioari jarraituta, (2.8), eta ondoren \mathcal{AG} -algoritmoa erabilia (ikusi (1) Algoritmoa), QoE-ak gidatutako Whittle-n oinarritutako indize erregela ondorioztatuko da. Indize hori erabiltzaile bakarrarentzat kalkulatzen da beste erabiltzaileen independenteki, eta hemendik aurrera k erabiltzailearen etiketak kenduko dira.

WM indizea horrela idatz daiteke formalki:

$$\text{WM}(a, d) = v_{(a,d)}^{\mathcal{F}} = \frac{\mathbb{R}_{(a,d)}^{<1,\mathcal{F}>} - \mathbb{R}_{(a,d)}^{<0,\mathcal{F}>}}{\mathbb{W}_{(a,d)}^{<1,\mathcal{F}>} - \mathbb{W}_{(a,d)}^{<0,\mathcal{F}>}} \quad (4.8)$$

4.1 Lema. Edozein (a, d) egoerarako eta edozein \mathcal{F} politikarako honakoa lortzen da:

$$v_{(a,d)}^{\mathcal{F}} = \frac{\beta[(1 - \mu_{(a,r)})\mathbb{R}_{(a+r,d+1)}^{\mathcal{F}} + \mu_{(a,r)} \cdot \widehat{\text{MOS}}(d+1) - \mathbb{R}_{(a,d+1)}^{\mathcal{F}}]}{1 + \beta[(1 - \mu_{(a,r)})\mathbb{W}_{(a+r,d+1)}^{\mathcal{F}} - \mathbb{W}_{(a,d+1)}^{\mathcal{F}}]} \quad (4.9)$$

Frogapena. Guztirako sari eta lan itxaropenen definizioetatik, honako adierazpenak lortzen dira:

$$\mathbb{R}_{(a,d)}^{\mathcal{F}} = \begin{cases} \mathbb{R}_{(a,d)}^{<1,\mathcal{F}>} = \beta[(1 - \mu_{(a,r)})\mathbb{R}_{(a+r,d+1)}^{\mathcal{F}} + \mu_{(a,r)} \cdot \widehat{\text{MOS}}(d+1)] & (a,d) \in \mathcal{F} \\ \mathbb{R}_{(a,d)}^{<0,\mathcal{F}>} = \beta\mathbb{R}_{(a,d+1)}^{\mathcal{F}} & (a,d) \notin \mathcal{F} \end{cases} \quad (4.10)$$

$$\mathbb{W}_{(a,d)}^{\mathcal{F}} = \begin{cases} \mathbb{W}_{(a,d)}^{<1,\mathcal{F}>} = 1 + \beta(1 - \mu_{(a,r)})\mathbb{W}_{(a+r,d+1)}^{\mathcal{F}} & (a,d) \in \mathcal{F} \\ \mathbb{W}_{(a,d)}^{<0,\mathcal{F}>} = \beta\mathbb{W}_{(a,d+1)}^{\mathcal{F}} & (a,d) \notin \mathcal{F} \end{cases} \quad (4.11)$$

(4.10) eta (4.11) espresioak (4.8) adierazpenean ordezkaturaz $v_{(a,d)}^{\mathcal{F}}$ -ren (4.9) formula osatuagoa lortzen da. Ohartu $[d]$ zein $[*]$ egoeretan lanik egiten ez dela suposatzen dugula; horrek $v_{[d]}^* = v_{[*]}^* = 0$ izatea eragingo du. \square

Bestalde, (a, d) egoeraren (4.9) Whittle indizearen adierazpenaren emaitza numerikoa izateko $(a + r, d + 1)$ eta $(a, d + 1)$ egoeren \mathcal{F} politika zehaztea beharrezkoa da. Intuizioz (a, d) egoeran egotea $(a + r, d + 1)$ eta $(a, d + 1)$ egoeretan egotea baino hobea dela esan genezake; batetik, Pareto banaketa batentzat eskuratutako zerbitzua ahalik eta baxuen izatea interesatuko litzaiguke bukatzeko probabilitatea altuagoa izateko, eta bestetik, zenbat eta txikiago atzerapena, handiago MOS funtzioaren balioa. Beraz, (a, d) egoeraren Whittle indizearen kalkulurako bai $(a + r, d + 1)$ bai $(a, d + 1)$ egoerak pasiboak izango lirarteke. Hau da, etorkizuneko egoeretan ez da komenigarria izango lan egitea atzerapena handitzen baita edota eskuratutako zerbitzua handiagoa izatekotan.

Dena den, aurreko suposaketa hori egia dela baieztatzeko, \mathcal{AG} -algoritmoa inplementatu da gure ikasketa kasurako. Horretarako era desberdinetako zenbait esperimentu numeriko burutu dira, eta iterazio bakoitzean zerbitzatzeko multzoaren egitura aztertu da. Ondorio bezala, algoritmoaren edozein i iteraziotan, Whittle indizea oraindik zehaztugabe daukan (a, d) egoera batean, $v_{(a,d)}^{\mathcal{F}_{i-1}}$ -ren kalkuluan eragina duten egoeren artean ez da egoera aktiborik existitzen \mathcal{F}_{i-1} zerbitzatzeko multzoan. Beraz, ares-tian errandako suposaketa egia dela frogatuta geratzen da. Aurreko guztia hazard rate beherakorra duten banaketa ororentzat aplikagarria dela esan genezake. Horrez gain, $v_{(a,d)_i}^*$ kantitateen ez gorakortasun indexabilitaterako baldintza betetzen dela egiaztatu da.

4.2 Proposizioa. *Pareto tamaina banaketa duten fluxuentzako WM indizea (4.12) da:*

$$\text{WM}(a, d) = \mu_{(a,r)} \cdot \widehat{\text{MOS}}(d+1) \quad (4.12)$$

Frogapena. Aldez aurretik jakina da $v_{(a,d)}^{\mathcal{F}}$ -ren kalkuluan eragina duten $(a, d + 1)$ eta $(a + r, d + 1)$ egoerak pasiboak direla. Honela, (4.10) eta (4.11) erabiliz, $v_{(a,d)}^{\mathcal{F}}$ espresioaren,

(4.9), emaitza numerikoa lortzeko beharrezkoak diren $\mathbb{R}_{(a,d+1)}^{\mathcal{F}}$, $\mathbb{R}_{(a+r,d+1)}^{\mathcal{F}}$, $\mathbb{W}_{(a,d+1)}^{\mathcal{F}}$ eta $\mathbb{W}_{(a+r,d+1)}^{\mathcal{F}}$ terminoak konputatzeari ekingo zaio. Modu honetan:

$$\mathbb{R}_{(a,d+1)}^{\mathcal{F}} = \beta \mathbb{R}_{(a,d+2)}^{\mathcal{F}}; \mathbb{R}_{(a,d+2)}^{\mathcal{F}} = \beta \mathbb{R}_{(a,d+3)}^{\mathcal{F}}; \mathbb{R}_{(a,d+3)}^{\mathcal{F}} = \beta \mathbb{R}_{(a,d+4)}^{\mathcal{F}}; \dots; \mathbb{R}_{(a,d>d_{\max})}^{\mathcal{F}} = 0.$$

Azkenengo termino hori, guztirako saria $d > d_{\max}$ duten egoera guztiak, nulua izatearen arrazoia atzerapen horietan MOS funtzio normalizatuaren balioa zero izatea da.

Beraz, $\mathbb{R}_{(a,d+1)}^{\mathcal{F}} = \beta^{d_{\max}-d-1} \mathbb{R}_{(a,d>d_{\max})}^{\mathcal{F}} = 0$ da, eta analogoki $\mathbb{R}_{(a+r,d+1)}^{\mathcal{F}} = 0$, $\mathbb{W}_{(a,d+1)}^{\mathcal{F}} = 0$ eta $\mathbb{W}_{(a+r,d+1)}^{\mathcal{F}} = 0$ dira.

Lau termino horiek (4.9) adierazpenean ordezkatzuz emaitza hauxe da:

$$v_{(a,d)}^{\mathcal{F}} = \beta \mu_{(a,r)} \cdot \widehat{\text{MOS}}(d+1) \quad (4.13)$$

Eta ondorioz, $\beta = 1$ denerako:

$$\text{WM}(a, d) = v_{(a,d)}^* = v_{(a,d)}^{\mathcal{F}} = \mu_{(a,r)} \cdot \widehat{\text{MOS}}(d+1).$$

□

Bukatzeko, WM indizearen (4.12) eta GM indizearen (4.6) adierazpenak konparatzen baditugu, Pareto fluxu tamaintzat **WM indize erregela eta GM indize erregela baliokideak** direla ondorioztatzen da. Hortaz, aztertutako problema definizioz restless motakoa bada ere, atzerapenaren gehikuntza konstantearen ondoriozko restless ezau-garri horrek jokamoldean eraginik ez duela dirudi. Honela, lortutako **QoE-aware indize erregela** horri Gittins-Whittle MOS deituko diogu, **GWM** hain zuzen ere. Modu honetan, 4.2 Definizioan formalki aurkezten den GWM indizerako proposatzen den GWM indize erregela 4.3 Definizioan laburtzen da.

4.2 Definizioa. Pareto tamaina banaketa duten fluxuentzako GWM indizea (4.14) da:

$$\text{GWM} = \mu_{(a,r)} \cdot \widehat{\text{MOS}}(d+1) \quad (4.14)$$

4.3 Definizioa. GWM indize erregela honakoan datza: erabakitze une bakoitzean, $\mu_{(a,r)} \cdot \widehat{\text{MOS}}(d+1)$ baliorik altuena duen erabiltzailea zerbitzatu ((4.14) erabiliz).

Uneko bukatzeko probabilitatearen eta MOS funtzio normalizatuaren biderkadura den heuristika simple horrek errendimendu aldetik emaitza onak ematen dituela egiaztatzen da geroago 6. Kapitulan.

4.3 Ondorioak

Kapitulu honen ekarpen nagusia trafiko fluxuen planifikazioan QoE-a maximizatzeko problemari aurre egiteko lortutako GWM indize erregela sinplea da.

Heuristika hori ondorioztatzeko 3. Kapitulan proposatutako QoE-aware MDP ereduaren ebazpenerako Gittins eta Whittle metodoak kalitate subjektiboaren testuingurura aplikatu dira. Bi kasuetan soluzio bera eskuratzen da, eta beraz, QoE-aware MDP-aren atzerapenaren gehikuntzaren ondoriozko restless ezaugarri horrek sistemaren portaeran eraginik ez duela dirudi.

Emaitzat QoE-aware den eta fluxu tamainan oinarritutako scheduling indize erregela lortu da, horren indizearen balioa eskuratutako zerbitzuaren menpekota den uneko bukatzeko probabilitatearen eta atzerapenaren menpekota den MOS funtzio normalizatuaren arteko biderkadura delarik. Hortaz, QoE-aware politika horrek estatistikoki bukatzeko gertuago dauden fluxuei eta QoE degradazio gehiegirik jasan ez dutenei lehenetasuna ematearen arteko konpromisoa bilatzen du, politika optimoaren ezaugarriekin koherentea izanik. Horrez gain, lortutako konputazionalki tratagarria den forma itxiko adierazpenak proposatutako indize erregelaren inplementazio arina ahalbidetzen du edozein planifikazio logikatan.

Beraz, orain arte aurkeztutako lana QoE-aware problema konplexuagoak ebazteko abiapuntua izango da, esate baterako sisteman kanal kapazitatearen bilakaera estokastikoa kontsideratuz, wireless sare batean erabiltzaileak mugimenduan daudenean gertatzen den bezalaxe.

5. Kapitulu

QoE-aren maximizaziorako indize erregelaren proposamena denboran aldakorra den kanalean

3. Kapituluaren erabiltearen kalitate subjektiboa maximizatzeko sare baliabideen planifikazio problemarako QoE-aware MDP eredu analitikoaren proposamena aurkeztu izan da, eta horren soluziotzat QoE-aware indize erregela proposatu da 4. Kapituluaren. Proposatutako QoE-aware eredu analitikoa zein scheduling diziplina QoE-an oinarritutako planifikaziorako oinarria dira, eta kanal kapazitatea konstantea den kasuan garatu izan dira. Hala ere, QoE-aware planifikaziorako emaitza horiek denboran aldakorra den kanalera hedatzeak interesa sortzen du, batez ere horrelako kanal ezaugarriak dituen wireless sareen arrakasta dela eta. Era honetan, kapitulu honetan QoE-aware scheduling problema kanal kapazitatea denboran aldakorra denerako aztertuko da.

Kanal kapazitatearen aldaketa denboralak kanal aldakorreko scheduling problemak berez restless motakoak izatea eragiten du. Horrela, denboran aldakorra den kanalera-ko planifikazio problemak kanal konstantekoak baino konplexuagoak dira, eta hortaz, proposatutako QoE-aware MDP-aren ebazpen zehatza lortzea posible ez bada kanal kapazitatea konstantea izanik, kanal kapazitatea aldakorra denean are gutxiago oraindik. Modu honetan, 5.2 atalean, lehenik eta behin QoE-aware MDP eredu hori kanal aldakorrera hedatuko da, eta ondoren, eredu berri horren soluzio bezala QoE-aware indize erregela berria proposatuko da. Horretarako, Whittle-n oinarritutako ebazpen

metodologia bat erabiliko da.

Kapitulu honen helburu nagusia kanal aldakorrean QoE-aren maximizatorako indize erregela proposatzea bada ere, horrez gain, lehendabizi banaketa orokorreko fluxuen tamainetarako denboran aldakorra den kanalean atzerapenaren minimizatorako Whittle-n oinarritutako indize erregela diseinatzeari ekingo zaio 5.1 atalean. Kanal aldakorrerako atzerapenaren minimizazio probleman erabilitako ebazpen metodologia denboran aldakorra den kanalean QoE optimizazio problema ebazteko funtsa izango da.

5.1 Fluxu tamaina banaketa orokorrerako atzerapenaren minimizaziorako indize erregelaren proposamena

Atal honetan fluxu tamainek zerbitzu denbora orokorra dutenean eta kanal kapazitatea denboran aldakorra denean batz besteko atzerapena minimizatzea helburutzat duen planifikazio estrategia nola diseinatzearen gaia landuko da. Lan honetan kanal aldakor ezaugarri hori duten wireless sareetan arreta jarriko da. Dena den, hemen lortutako emaitzak kanal aldakorreko edozein testuingururako baliagarriak dira.

Fading, shadowing eta interferentzia efektuak direla eta, haririk gabeko beheranzko lotura baten kalitateak, eta hortaz, bere transmisio tasak, denboran zehar fluktuatzen du. Horrek opportunistic motako planifikatzaileei hizpidea eman die, zeintzuek kanal fluktuazio horiek aprobeztatzen dituzten bere kanalaren portaera estatistikoarekiko kanal kondizio ona duen erabiltzailea zerbitzatuz, begiratu adibidez [Borst'2005]. Era honetan, agertoki dinamiko batean, zeinetan erabiltzaileak heldu eta zerbitzua bukatutakoan irteten diren, helburua batz besteko atzerapena, batz besteko itzarote denbora edo batz besteko erabiltzaile kopurua minimizatzea denean, irabazi oportunistak aprobeztatzen den bitartean bukatugabeko erabiltzaile kopurua baxu nola mantendu erronka da. Alabaina, azpimarratzekoa da aldiuneko kapazitate onena duen erabiltzailea zerbitzatzen duten politika gutziatsu edo epe motzerakoek, MR diziplina kasu, agertoki horretan errendimendu txarra ematen dutela, esate baterako begiratu [Borst'2005] edo [Ayesta'2010].

Urteetan zehar beheranzko haririk gabeko kanaletan fluxu mailako scheduling optimoari eta errendimendu ebaluazioari buruzko literatura izugarri hazi da [Bonald'2004; Hu'2004; Borst'2005; Ayesta'2010; Sadiq'2010; Aalto'2011; Jacko-b'2011; Cecchi'2013]. Gure lanerako bereziki aipagarria den ikerketa [Ayesta'2010] da, zeinetan kopuru finituko kanal kondizioak eta banaketa esponentzialeko fluxuak kontsideratzen diren, eta planifikazio optimorako problema restless motako MDP markoan formulatzen den. Lortutako eredia nabariki zaila izanda orokorrean, ez du soluzio optimo tratagarria eskuratzea ahalbidetzen, *PSPACE-hard* izateagatik [Papadimitriou'1999]. Restless bandits teoriaren orain dela gutxiko aurrerapenak erabilia [NinoMora'2007], [Ayesta'2010] laneko egileek, Whittle indizea karakterizatuz, Whittle-n oinarritutako PI deitutako indize erregela sinplea garatzen dute, simulazioetan ondo funtzionatzen duela ilustratzen dutelarik. [Ayesta-b'2011; Kim'2012] azterlanen arabera, [Ayesta'2010] laneko Whittle indizean oinarritutako scheduling estrategiak egonkortasun maximo eta fluido-optimalitate ezaugarriak ditu. Horrez gain, Whittle indize erregela horrek asintotikoki optimoa izateko ezaugarria du (iritsierarik eta irteerarik ez dagoen kasuan) fluxu kopurua eta zerbitzari kopurua infiniturantz hazten denean, zenbait suposaketa teknikoren

pean [Weber'1990].

Tesi lan honetan denboran aldakorrek diren kanaletan tamaina banaketa orokorreko fluxuen planifikazioan atzerapena minimizatzen duen estrategia bilatzeari ekingo zaio. Era honetan, itxarote-kostu itxaropena minimizatzea helburutzat duen fluxu-mailako eredia kontsideratuko da, zeinak kasu berezi bezala bukatugabeko erabiltzaile kopuruaren eta batuz besteko atzerapenaren (itxarote denboraren) minimizazioa kontenplazten dituen. Fluxu-tamaina banaketa orokorra kontsideratzea aurrerapausoa da espontzialki banatutako tamainak suposatzen dituen aurreko literaturarekin alderatuta. [Borst'2005] lana salbuespena da, non, zenbait suposaketaren pean, banaketa orokorreko fluxu tamainen kasurako PF diziplina egoeraren menpekoa den *processor-sharing* ilada baten bidez modela daitekeela erakusten den.

Aurreko guztia ikusita, gure helburua lortzeko [Ayesta'2010] lanean aurkeztutako eredia fluxu-tamaina banaketa orokorreko kasura hedatuko da. Modu honetan, 5.1.1 puntuan problemaren deskribapena aurkeztu ostean, 5.1.2 atalean problema MDP bat bezala formulatuko da. Ondoren, 5.1.3 sekzioan, Whittle-n oinarritutako indize erregela lortzen da.

5.1.1 Problemaren deskribapena

Jarraian wireless sistema bateko zelula bakarrean beheranzko trafikoaren planifikazio problema karakterizatuko da. Denboran zirrikitutako sistema kontsideratzen da, eta hortaz, denbora diskretuko atazen scheduling problema aztertuko da.

Sisteman K erabiltzaile daudela suposatu, $k \in \mathcal{K} := \{1, 2, \dots, K\}$ hizkiaz etiketatuta. Erabiltzaile bakoitza berak eskatutako trafiko fluxuarekin eta dagokion haririk gabeko kanalarekin lotzen da. k erabiltzailearen fluxu tamainak banaketa orokorra du, $\mathbb{E}[X_k] < \infty$ izanik. Erabiltzaileen fluxu tamainak independenteki banatuta daudela suposatzen da. k erabiltzaile bakoitzerako denbora une bakoitzean $c_k > 0$ itxarote kostua ordaintzen da eskatutako fluxu osoaren transmisioa bukatzen den arte.

Kanal ereduari dagokionez, k erabiltzailearentzat kanalaren kalitateak (kanal kondizioa) k -ren menpekoa den banaketa baten arabera eboluzionatzen du, sisteman dauden beste erabiltzaile guztien independenteki. Horrez gain, kanal egoeren artean korrelaziorik ez dagoela kontsideratzen da. Erabiltzaile bakoitzarentzat kanala N_k egoera posibleetan egon daitekeela suposatzen da, kanal kondizio finitu horiek $\mathcal{N} := \{1, 2, \dots, N_k\}$ multzo finitukoak izanik. Kanal kondizio desberdinak transmisio tasa desberdinetara itzultzen dira; transmisio tasa horiek erabilitako wireless teknologiaren arabekoak diren modulazio eta kodifikazio eskemei lotuta daude. k erabiltzailea n egoeran $q_{k,n}$ probabilitatearekin dago, $\sum_{n \in \mathcal{N}} q_{k,n} = 1$ delarik, eta egoera horretan $s_{k,n}$ transmisio tasa jasotzen du ($r_{k,n}$ bit transmititzen dira kanalera transmisio une bakoitzean). Kanal

egoerak $s_{k,1} \leq s_{k,2} \leq \dots \leq s_{k,N_k}$ eran ordenatzen direla suposatzen da.

Bestalde, fluxuaren transmisioa bukatzeko probabilitatea karakterizatzeko asmoz, aurretik edozein r balio oso positiborentzat eta $F_k(x)$ banaketarako *Generalized Hazard Rate* (GHR) edo hazard ratio orokor funtzioa definitzea erabilgarria da (begiratu (5.1)):

$$H_k(x, r) = \frac{F_k(x+r) - F_k(x)}{1 - F_k(x)} \quad (5.1)$$

Orduan, erraz ikus daiteke a eskuratutako zerbitzua duen eta n kanal egoeran dagoen k erabiltzaile baten bukatzeko probabilitatea (5.2) dela:

$$\mu_{k,(a,n)} = H_k(a, r_n) \quad (5.2)$$

Bestaldetik, planifikatzaileari dagokionez, helburua sistemako erabiltzaileen batz besteko atzerapena minimizatzea da. Oinarri-estazioan dagoen scheduler-ak erabiltzaile bakoitzaren kanal kapazitatea zein den jakiteko Kanalaren Kalitate Adierazle (CQI) txostenak bidaltzen dira tresna mugikorretatik oinarri-estaziora. CQI horiek kanal abiadurara itzultzen dira. Modu honetan, planifikatzaileak, transmisio une edo *Transmisio Time Interval* (TTI) bakoitzaren hasieran, CQI-en bidez lortutako kanal kondizioa eta bere memoriatik hartutako eskuratutako zerbitzua behatzen ditu, eta TTI horretan zein erabiltzaile zerbitzatu erabakitzen du. Era honetan, Π onargarriak diren politiken multzoak, *channel-awareness* eta aurreratu gabetasun ezaugarriak izango ditu. Horrez gain, zerbitzu unitarioa eta desokupazio modua kontsideratzen dira. Era honetan, $\pi \in \Pi$ politika batentzat, T_k^π zorizko aldagaiak k erabiltzaileak sisteman igarotako denbora une kopurua adierazten du. Modu honetan, planifikatzailearen helburua (5.3) optimizazio problema ebazten duen politika aurkitzea da:

$$\max_{\pi \in \Pi} \frac{1}{K} \sum_{k \in \mathcal{K}} \mathbb{E}_0^\pi \left[\sum_{t=0}^{T_k^\pi} \beta^t \right] \quad (5.3)$$

Zehazki, deskontu gabeko kasurako (5.3) problema batz besteko atzerapena minimizatzearena da (5.4):

$$\max_{\pi \in \Pi} \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \mathbb{E}_0^\pi [T_k^\pi] \quad (5.4)$$

Hurrengo sekzioan arestian deskribatutako atzerapenaren minimizaziorako channel-aware planifikazio problema horri dagokion MDP eredua definituko da.

5.1.2 MDP formulazioa

Atal honetan aurreko 5.1.1 puntuan aurkeztutako kanal aldakorrean fluxu tamaina banaketa orokorrerako batz besteko atzerapenaren minimizazio problema MDP plataforman formulatzen da. Hemen lantzen den problema atazen planifikaziora egokitutako restless bandit problemaren esparruan sartzen da [Whittle'1988; Jacko'2010], eta proposatuko den MDP eredua [Ayesta'2010] lanean tamaina esponentzialentzat planteatutakoarenaren tamaina banaketa orokorrerako hedapena edo orokortzea da, horretarako eskuratutako zerbitzua kontuan hartuko delarik oraingoan.

5.1.2.1 MDP eredua

Denbora une bakoitzaren hasieran, k erabiltzaile bat zerbitzatua izan daiteke edo ez. k erabiltzaile baten akzio-espazioa \mathcal{B} -ren bidez denotatzen dugu; $\mathcal{B} := \{0, 1\}$, non 0 akzioak ez zerbitzatzea adierazten duen eta 1 akzioak zerbitzatzea. n kanal kondizioan dagoen erabiltzaile bat transmititzeko hautatzen bada, horren $r_{k,n}$ bit transmitituko dira kanalera TTI horretan.

k erabiltzaile bakoitza $(\mathcal{S}_k, (\mathbf{R}_{k,s}^b)_{b \in \mathcal{B}}, (\mathbf{W}_{k,s}^b)_{b \in \mathcal{B}}, (\mathbf{P}_{k,s}^b)_{b \in \mathcal{B}})$ tuplaren bidez definitzen da horrela:

- $\mathcal{S}_k = (\mathcal{A}_k \times \{1, 2, \dots, N_k\}) \cup \{[*]\}$ egoera-espazioa k erabiltzaile baten s egoeren multzoa da zeina
 - fluxu transmisioa bukatugabe dagoen bitartean: bi dimentsiotako $s = (a, n)$ egoerak ditugun, $a \in \mathcal{A}_k$ eskuratutako zerbitzu, \mathcal{A}_k eskuratuko zerbitzu maila posibleen espazioa izanik, eta $n \in \{1, 2, \dots, N_k\}$ kanal kondizio osagaiez osatuak;
 - transmisioa bukatuta dagoenean: $s = [*]$ egoera xurgatzailea dugun.

Aipatzekoa da eskuratutako zerbitzu maila horiei dagokien eskuratutako zerbitzuak nulua ez den lehenengo r_n transmisio tasaren multiploak direla.

- $\mathbf{R}_k^b := (R_{k,s}^b)_{s \in \mathcal{S}_k}$, non $R_{k,s}^b$ TTI baten hasieran b akzioa hautatzen bada s egoeran dagoen k erabiltzailearentzat, erabiltzaile horrek jasotako une-bateko sari itxaropena den,

$$R_{k,(a,n)}^0 = -c_k, \quad R_{k,(a,n)}^1 = -c_k(1 - \mu_{k,(a,n)}), \quad R_{k,[*]}^b = 0;$$

Definitutako sari horiek sisteman jarraitzearen kostu itxaropena adierazten dute.

- $W_k^b := (W_{k,s}^b)_{s \in \mathcal{S}_k}$, non $W_{k,s}^b$ TTI baten hasieran b akzioa aukeratzen bada s egoeran dagoen k erabiltzailearentzat, erabiltzaile horrek egindako une-bateko lan itxaropena den,

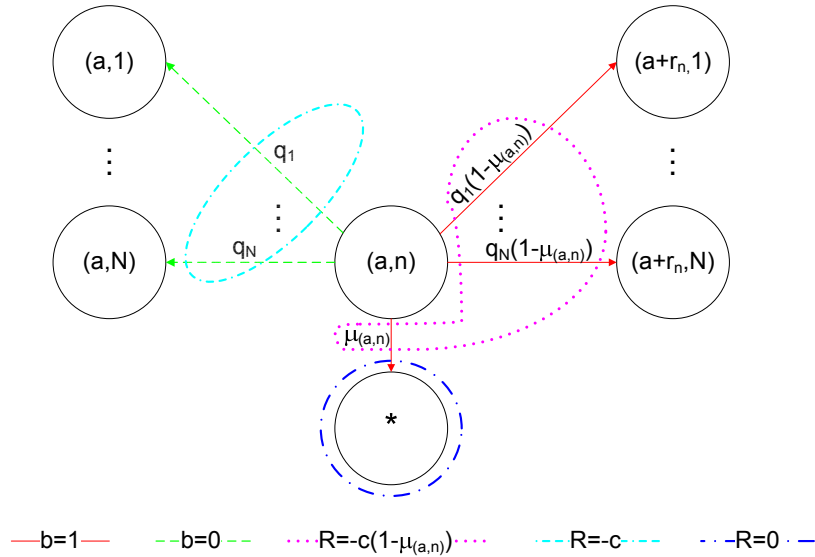
$$W_{k,s}^0 = 0, \quad W_{k,s}^1 = 1;$$

- $P_k^b := (p_k^b(s, s'))_{s, s' \in \mathcal{S}_k}$, non $p_k^b(s, s')$ TTI baten hasieran b akzioa aukeratzen bada k erabiltzailearentzat, erabiltzaile hori s egoeratik s' egoerara mugitzeko probabilitatea den,

$$\begin{aligned} p_k^0((a, n), (a, m)) &= q_{k,m}, & p_k^1((a, n), (a + r_n, m)) &= q_{k,m} \cdot (1 - \mu_{k,(a,n)}), \\ p_k^1((a, n), [*]) &= \mu_{k,(a,n)}, & p_k^0([*], [*]) &= 1; \end{aligned}$$

Modu honetan, k erabiltzailearen dinamika $s_k(t) \in \mathcal{S}_k$ egoera-prozesuak eta $b_k(t) \in \mathcal{B}$ akzio-prozesuak kapturatzeko dute.

Laburpen gisa, 5.1 Irudian, arestian deskribatutako MDP ereduaren elementuak beha daitezke, zeinetan erabiltzaile baten MDP horren egoera diagramaren zati bat adierazten den.



5.1 Irudia: Erabiltzaile baten channel-aware MDP egoera diagramaren zati bat.

5.1.2.2 Optimizazio problema

(5.3) edota (5.4) batuz besteko atzerapenaren minimizazio problemari lotutako aurkeztutako MDP-ari dagokion itxarote-kostuaren itxaropenaren minimizazio problema horrela idatz daiteke:

$$\begin{aligned} \max_{\pi \in \Pi} \mathbb{E}_0^\pi \left[\sum_{t=0}^{\infty} \sum_{k \in \mathcal{K}} R_{k,(a_k(t),n_k(t))}^{b_k(t)} \right] \\ \sum_{k \in \mathcal{K}} b_k(t) = 1 \quad \forall t \end{aligned} \quad (5.5)$$

Ezaguna da esleipen baldintza horrek tratagarritasun eza eragiten duela antzeko problemetan [Whittle'1988], eta horrek gure problemarako soluzio hurbildua diseinatzera bultzatzen gaitu.

5.1.3 Whittle indizean oinarritutako soluzioa

Sekzio honetan Whittle-n metodologia erabilia (5.5) problemari Whittle indizean oinarritutako soluzioa emango zaio. Horretarako, lehenik eta behin, (5.5) problemari Whittle-n erlaxazioa [Whittle'1988] eta ondoren lagrangiar metodoak [Visweswaran'2009] aplikatuta, (5.6) adierazpenean azaltzen den erabiltzaile bakarreko v prezioan oinarritutako problema sinplifikatua lortzen da.

$$\max_{\pi_k \in \Pi} \sum_{t=0}^{\infty} \mathbb{E}_0^\pi \beta^t \cdot \left[R_{k,(a_k(t),n_k(t))}^{b_k(t)} - v \cdot W_{k,(a_k(t),n_k(t))}^{b_k(t)} \right] = \max_{\mathcal{F} \subseteq S_k} \mathbb{R}_{k,(a,n)}^{\mathcal{F}} - v \mathbb{W}_{k,(a,n)}^{\mathcal{F}} \quad (5.6)$$

(5.6) problema indexablea [Jacko'2010] bada \mathcal{F} zerbitzatze multzoarekiko, k erabiltzailearen (a, n) egoera bakoitzerako Whittle indizea existitzen da. Fluxu tamaina esponentzialentzat indexabilitatea frogatu izan den arren [Ayesta'2010], gure ereduaren konplexutasuna dela eta hau ez da hertsiki frogatu gure kasurako.

5.1 Konjektura. (5.6) problema indexablea da.

5.1 Konjektura gainontzeko sekzioan onartzen da. Era honetan, gure problemarako Whittle indizearen ezaugarri nagusiak 5.1.3.1 puntuan ondorioztatu ondoren, Whittle-n oinarritutako indize erregelaren adierazpen matematiko itxia lortzeari ekingo zaio 5.1.3.2 atalean. Hemendik aurrera k erabiltzailearen etiketak kenduko dira.

5.1.3.1 Whittle indizearen propietateen azterketa

Whittle indizearen definizioa aplikatuta, (2.8), (5.6) problemari dagokion Whittle indizea, $v_{(a,n)}^*$, horrela idatz daiteke formalki:

$$v_{(a,n)}^* = v_{(a,n)}^{\mathcal{F}} = \frac{\mathbb{R}_{(a,n)}^{\langle 1, \mathcal{F} \rangle} - \mathbb{R}_{(a,n)}^{\langle 0, \mathcal{F} \rangle}}{\mathbb{W}_{(a,n)}^{\langle 1, \mathcal{F} \rangle} - \mathbb{W}_{(a,n)}^{\langle 0, \mathcal{F} \rangle}} \quad (5.7)$$

5.1 Lema. Edozein (a, n) egoerarako eta edozein \mathcal{F} politikaren pean hauxe lortzen da:

$$v_{(a,n)}^{\mathcal{F}} = \frac{c\mu_{(a,n)} + \beta(1 - \mu_{(a,n)}) \sum_{m \in \mathcal{N}} q_m \mathbb{R}_{(a+r_n, m)}^{\mathcal{F}} - \beta \sum_{m \in \mathcal{N}} q_m \mathbb{R}_{(a, m)}^{\mathcal{F}}}{1 + \beta(1 - \mu_{(a,n)}) \sum_{m \in \mathcal{N}} q_m \mathbb{W}_{(a+r_n, m)}^{\mathcal{F}} - \beta \sum_{m \in \mathcal{N}} q_m \mathbb{W}_{(a, m)}^{\mathcal{F}}} \quad (5.8)$$

Frogapena. Sari eta lan definizioetatik, hurrenez hurren, honakoa daukagu:

$$\mathbb{R}_{(a,n)}^{\mathcal{F}} = \begin{cases} -c(1 - \mu_{(a,n)}) + \beta(1 - \mu_{(a,n)}) \sum_{m \in \mathcal{N}} q_m \mathbb{R}_{(a+r_n, m)}^{\mathcal{F}} & (a, n) \in \mathcal{F} \\ -c + \beta \sum_{m \in \mathcal{N}} q_m \mathbb{R}_{(a, m)}^{\mathcal{F}} & (a, n) \notin \mathcal{F} \end{cases} \quad (5.9)$$

$$\mathbb{W}_{(a,n)}^{\mathcal{F}} = \begin{cases} 1 + \beta(1 - \mu_{(a,n)}) \sum_{m \in \mathcal{N}} q_m \mathbb{W}_{(a+r_n, m)}^{\mathcal{F}} & (a, n) \in \mathcal{F} \\ \beta \sum_{m \in \mathcal{N}} q_m \mathbb{W}_{(a, m)}^{\mathcal{F}} & (a, n) \notin \mathcal{F} \end{cases} \quad (5.10)$$

(5.8) adierazpena (5.9) eta (5.10) bertan sartuz lortzen da. Ohartu $v_{[*]}^* = 0$ izango dela, behin fluxuaren transmisioa bukatuta lanik egiteak zentzurik ez baitu. \square

Hala ere, (5.8) Whittle indizeari dagokion adierazpen analitiko itxia edota horren emaitza numerikoa lortzeko \mathcal{F} zerbitzatze multzoa zehaztea ezinbestekoa da, eta gure problemarako zerbitzatze multzo horren estruktura ez da jakina hasiera batean. Modu honetan, bai eskuratutako zerbitzuaren bai kanal kondizioaren menpekoak diren (a, m) eta $(a + r_n, m)$ egoerak zerbitzatze multzoaren barruan nola ordenatzen diren asmatzea nahitaezkoa da. Esate baterako, kanal kondizio hobeko egoerek kanal kondizio txarragoko egoerak zenbait eskuratu zerbitzu mailentzat gainditzen dituztela, egoera horietan Whittle indize altuagoa izanda, suposatzen badugu ere, hau guztia egiaztatu beharrekoa da. Horretarako, (5.8) erabilia \mathcal{AG} -algoritmoa ((1) Algoritmoa) inplementatu da gure problemarako, eta horren bidez lortutako Whittle indize balio numerikoak aztertuta, gure ikasketa kasurako Whittle indizeari dagozkion oinarriko propietateak ondorioztatu dira.

Era honetan, Whittle indizeak numerikoki lortzeko \mathcal{AG} -algoritmoa erabilia esperimentu numeriko ugari burutu dira. Horrela, ondoren, esperimentu horiek guztietan

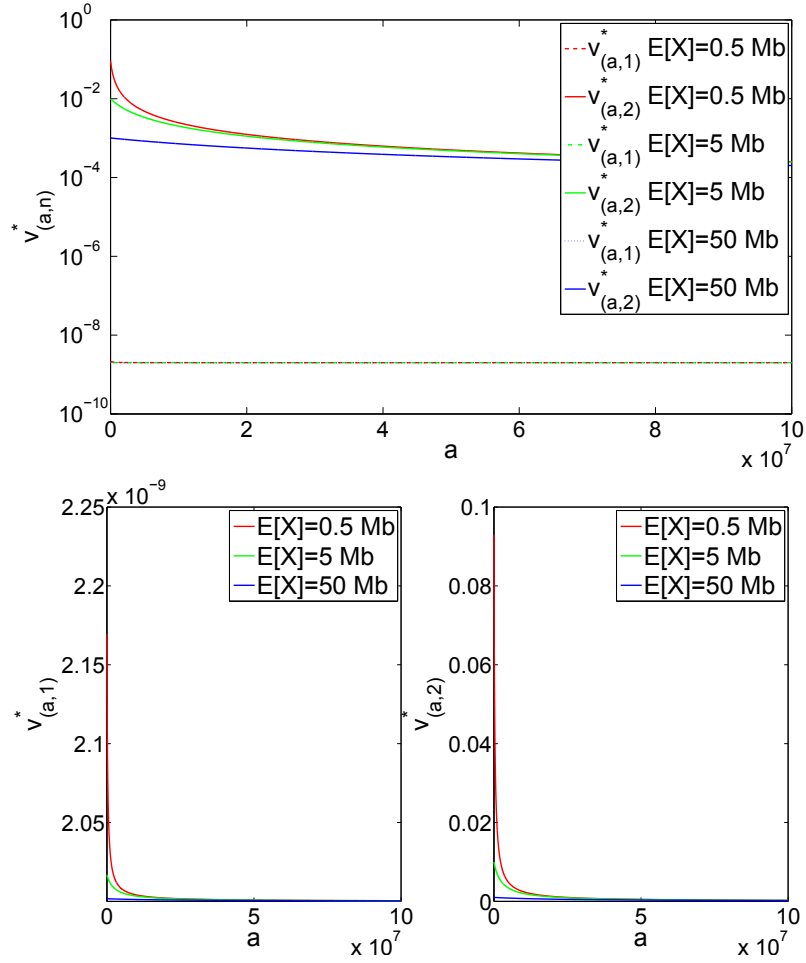
betetzen diren oinarrizko propietateak aztertuko dira. Atzerapena minimizatzeko helburuarekin, $\beta \approx 1$ kasua aztertuko da, eta hemen lortu eta adierazten diren emaitzak $1 - \beta$ faktoreagatik biderkatu dira, $\beta \approx 1$ denerako lortutako balio oso altuak ekiditeko (sarien batukarien ondorioz izendatzaileetan ager daitezkeen $1 - \beta$ terminoak direla eta). Lehendabizi, bi kanal kondizio soilik izanda ondorioztatutako ezaugarriak aurkeztuko dira, eta ondoren, gure ikasketa N kanal kondizioetara zabalduko da, hiru kanal kondizioeko esperimentuak aztertuta. Esperimentu guztietan erabilitako fluxuen tamaina banaketa Pareto (3.1) da.

Probabilitate banaketa bat *Decreasing Generalized Hazard Rate* (DGHR) klasekoa dela esango dugu edozein eskuratutako zerbitzurako eta $r_{k,n}$ zerbitzu tasa guztientzat GHR-a beherakorra bada. Ezaguna da hemen erabiliko den Pareto banaketak DHR ezaugarria duela. Hala ere, ohartu banaketa hori normalean DGHR klaseari badagokio ere, propietate hori ez dela orokorrean betetzen nahitaez.

Bi kanal kondizioetako esperimentuan emaitzak 5.2 eta 5.3 Irudietan laburbiltzen dira, zeinetan adibidetzat hartutako zenbait esperimentuan indizeen balioak erakusten diren. Gisa honetan, Whittle indizearen inguruan ondorengo oinarrizko propietateak ondorioztatzen dira:

- (i) Kanal kondizio onerako indizeen balio guztiak kanal kondizio txarra dutenenak baino handiagoak dira, hau da, $v_{(a,2)}^* > v_{(a',1)}^* \forall a, a' \in \mathcal{A}$. Bereziki, eskuratutako zerbitzu berdinentzat Whittle indizearen balioa kanal kondizio onean handiagoa da: $v_{(a,2)}^* > v_{(a,1)}^*$. Ezaugarri hori 5.2 Irudiko goiko grafikoan ilustratzen da.
- (ii) 5.2 Irudiko beheko grafikoetan beha daitekeenez, kanal kondizio berdinerako Whittle indizeen balioak GHR-aren arabera ordenatzen dira. DGHR banaketa barentzat (Pareto banaketa) indizeen balioak eskuratutako zerbitzuarekiko beherakorrak dira, hau da, $v_{(a,n)}^* > v_{(a',n)}^* \forall a < a'$.
- (iii) Kanal kondizio onerako Whittle indizearen balioa kanal egoera probabilitatearekin inbariantea da (5.3 Irudiko eskuineko grafikoan ilustratuta).
- (iv) Kanal kondizio txarrerako Whittle indizearen balioa q_2 handitzen den heinean txikiagotzen da (5.3 Irudiko ezkerreko grafikoan ilustratuta).

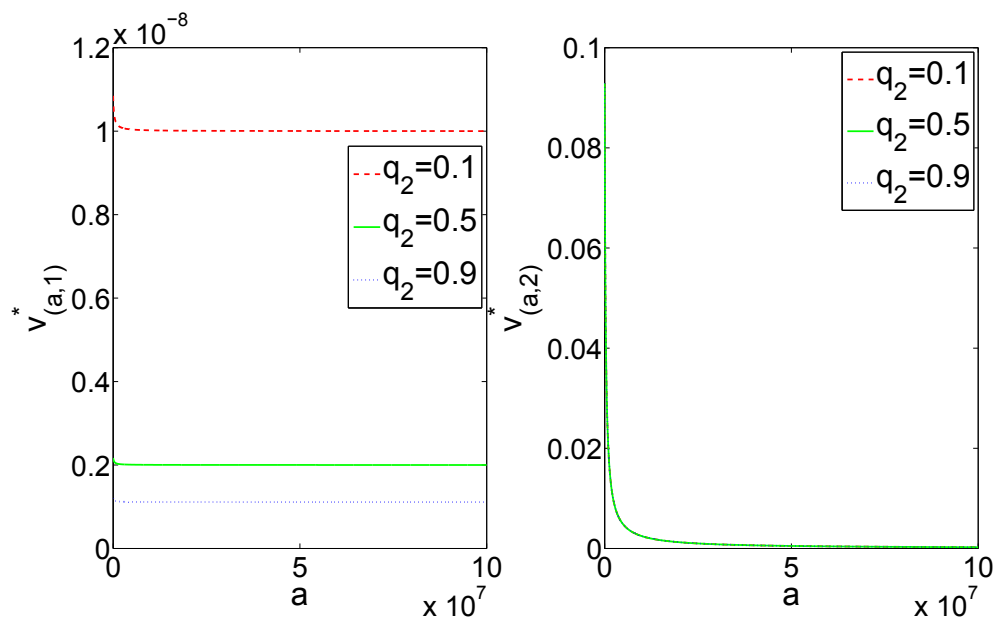
Era berean, aurreko lau propietate horiek kanal egoera kopurua bi baino handiagoa denerako aztertuko dira. Esperimentuak hiru kanal kondizioetara murriztearen arrazoiak kanal kopurua handitzean \mathcal{AG} -algoritmoaren exekuzio denbora nabarmenki hazten dela da. Algoritmo honek $\mathcal{O}(A^{N+1})$ oinarrizko eragiketa burutzen ditu indize



5.2 Irudia: Bi kanalen kasurako Whittle indize normalizatuak batuz besteko tamaina desberdinentzat. $\alpha = 1.5$ duen Pareto banaketa erabiltzen da, $q_2 = 0.5$, $r_1 = 8.4$ Kb eta $r_2 = 16.8$ Kb izanik.

guztien balioak kalkulatzeko, non $A := \max_i |\mathcal{A}_i|$ den. Dena den, egindako esperimenduetan hiru kanal kondizio erabili badira ere, lortutako emaitzak N kanal egoeren kasurako baliagarriak direla esan genezake. Modu honetan, N kanal egoera daudenean Whittle indizearen oinarritzko propietateak jarraian adierazten den bezala orokortzen dira:

- (i) Kanal kondizio onenerako, N egoera hain zuzen ere, indizeen balio guztiak gainontzeko kanal egoerenenak baino handiagoak dira: $v_{(a,N)}^* > v_{(a',m)}^* \forall a, a' \in \mathcal{A}, \forall m < N$ (ikus 5.4 eta 5.5 Irudiak). Hala ere, orokorrean, kanal egoera handiagoa izateak ez du ziurtatzen kanal hobeko dagoenarenaren indizearen balioa kanal txarragoan dagoen beste batena baino handiagoa denik; hau da, $v_{(a,m_1)}^* > v_{(a',m_2)}^* \forall a, a' \in \mathcal{A}, \forall m_1 < N, m_2 < N, m_1 > m_2$

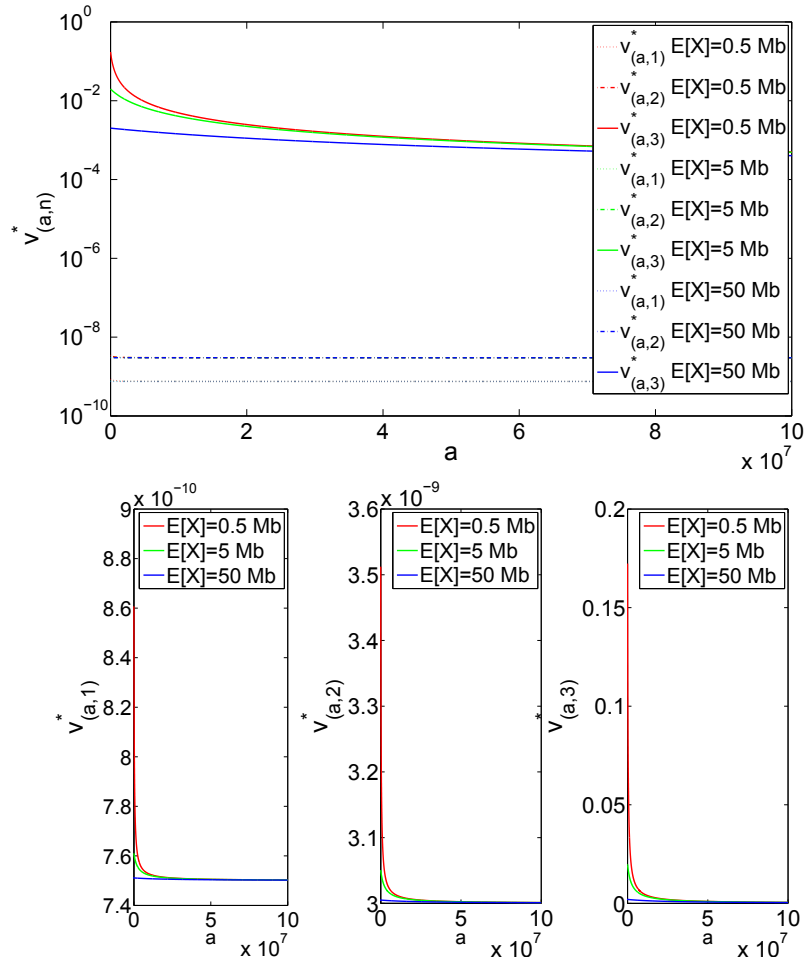


5.3 Irudia: Bi kanalen kasurako Whittle indize normalizatuak kanal egoera probabilitate desberdinentzat. $\alpha = 1.5$ eta $\mathbb{E}[X] = 5$ Mb duen Pareto banaketa erabiltzen da, $r_1 = 8.4$ Kb eta $r_2 = 16.8$ Kb izanik.

ez da beti betetzen (5.5 Irudiko beheko grafikoan adierazita). Bestetik, bi kanalen kasurako betetzen den bezalaxe, eskuratutako zerbitzu berdinentzat Whittle indizearen balioa kanal kondizio hobean handiagoa da: $v^*_{(a,m_1)} > v^*_{(a,m_2)} \forall m_1 > m_2$ (5.4 Irudiko goiko grafikoan eta 5.5 Irudian beha daiteke).

- (ii) Oraingoan ere kanal kondizio berdinerako Whittle indizeen balioak GHR-aren arabera ordenatzen dira, Pareto bezalako DGHR klasekoa den banaketa batentzat indizeen balio horiek eskuratutako zerbitzuarekiko beherakorrak izanik. (5.4 Irudian beheko grafikoetan ilustratuta).
- (iii) N kanal kondiziorako Whittle indizearen balioa kanal egoera probabilitatearekin inbariantea da ere (begiratu 5.6 Irudian eskuineko grafikoa).
- (iv) Kanal onena ez den kanal egoera bateko Whittle indizearen balioa kanal hobea- goen kanal egoera probabilitateak handitzen diren heinean txikiagotzen da (begiratu 5.6 Irudiko eskuineko eta erdiko grafikoak).

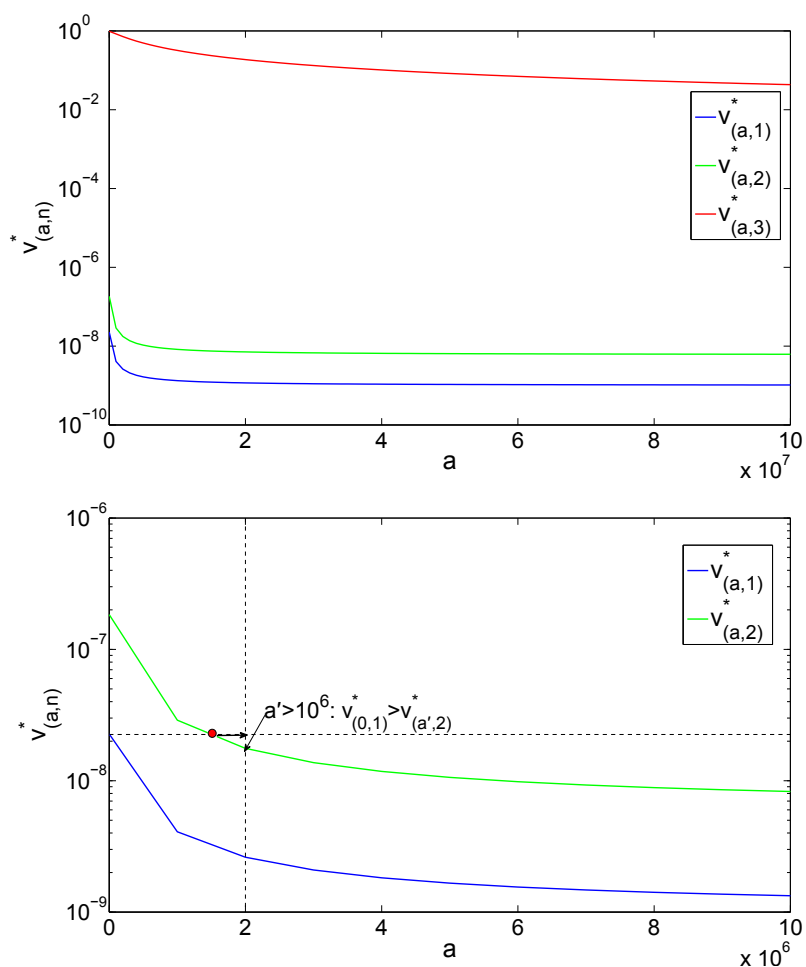
Bestalde, aipatzekoa da $v^*_{(a,n)_i}$ kantitateen ez gorakortasun indexabilitate baldintza betetzen dela.



5.4 Irudia: Hiru kanalen kasurako Whittle indize normalizatuak batuz besteko tamaina desberdinentzat. $\alpha = 1.5$ duen Pareto banaketa erabiltzen da, $q_1 = q_2 = q_3 = 1/3$, $r_1 = 8.4$ Kb, $r_2 = 16.8$ Kb eta $r_3 = 33.6$ Kb izanik.

5.1.3.2 Whittle indizearen adierazpena

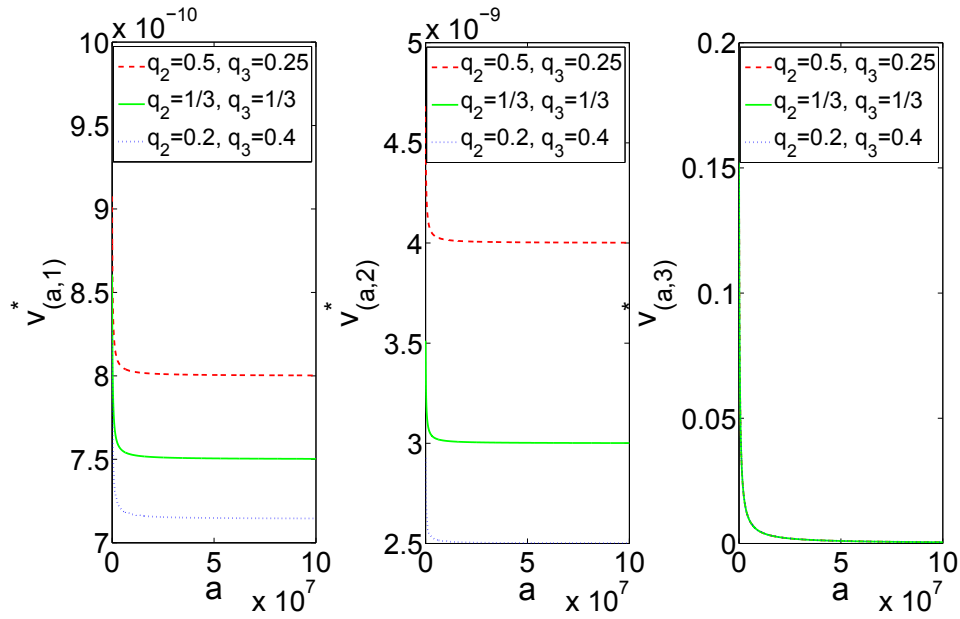
Aurreko azpi-atalean \mathcal{AG} -algoritmoa aplikatuta numerikoki lortutako Whittle indizearen propietateak aurkeztu dira. Indizearen balioaren konputaziorako \mathcal{AG} -algoritmoa erabiltzea denborari dagokionez kostu handikoa da, zenbait kasutan ez tratagarria suerta daitekeelarik eskuratutako zerbitzu maila kopurua edota kanal egoera kopurua hantitzen den heinean. Horrez gain, algoritmo horrek eskuratutako zerbitzu maila posibleen multzo infinitua moztea eskatzen du, indizearen balioaren doitasuna murriztuz. Gainera, $\beta \approx 1$ denerako numerikoki ezegonkorra da. Modu honetan, azpi-atal honetan Whittle indizearen forma-itxiko karakterizazioa ondorioztatzeari ekingo zaio, zeinarentzat numerikoki behatutako propietateak \mathcal{F} politika optimoaren egitura asmatzeko erabilgarriak izan diren. Hemen lortuko diren emaitzek Whittle indizearen konputazioa



5.5 Irudia: Hiru kanalentzako Whittle indize normalizatuak. $\alpha = 1.5$ eta $\mathbb{E}[X] = 0.5$ Mb duen Pareto banaketa erabiltzen da, $q_1 = q_2 = q_3 = 1/3$, $r_1 = 1$ Mb, $r_2 = 2$ Mb eta $r_3 = 3$ Mb izanik.

denboran zein doitasunean hobetzea espero da.

Lehenik eta behin, forma-itxia duen Whittle indize orokorra ondorioztatuko da 5.1.3.2.1 puntuan. Ondoren, 5.1.3.2.2 azpi-atalean indize hori DGHR motako banaketen kasurako partikularizatuko da. Bukatzeko, 5.1.3.2.3 puntuan, konputazionalki tratagarriagoa den Whittle-n oinarritutako indize erregela hurbildua proposatzen da.



5.6 Irudia: Hiru kanalen kasurako Whittle indize normalizatuak kanal egoera probabilitate desberdinentzat. $\alpha = 1.5$ eta $\mathbb{E}[X] = 5$ Mb duen Pareto banaketa erabiltzen da, $r_1 = 8.4$ Kb, $r_2 = 16.8$ Kb eta $r_3 = 33.6$ Kb izanik.

5.1.3.2.1 Adierazpen orokorra

5.1an azaltzen denaren arabera, fluxu-tamaina banaketa orokorrerako Whittle indizeak forma-itxiko adierazpen nahiko konplikatu bat onartzen du. Adierazpen hori lortzeko garapen matematikoa eta frogapenak A Eranskineko A.1 atalean aurkezten dira. 5.1 Proposizioaren frogapenak deskontuko kasurako analisia egiten du, eta interesatzen zaigun deskonturik gabeko indizearen balioa $\beta \rightarrow 1$ limitean lortzen da.

5.1 Proposizioa. (5.6) problemarako $v_{(a,n)}^*$ Whittle indizearen adierazpen analitikoa deskontu gabeko kasuan hauixe da:

$$v_{(a,n)}^* = \frac{c\mu_{(a,n)} + (1 - \mu_{(a,n)})R_{a_1} - R_{a_2}}{1 + (1 - \mu_{(a,n)})W_{a_1} - W_{a_2}} \quad (5.11)$$

non $a_1 := a$ eta $a_2 := a + r_n$ definitzen ditugun, eta $z \in \{1, 2\}$ denerako,

$$W_{a_z} := \begin{cases} \frac{\sum_{m^{z,(0)} > t_{z,0}} q_{m^{z,(0)}} W_{(a_z, m^{z,(0)})}}{\sum_{m^{z,(0)} > t_{z,0}} q_{m^{z,(0)}}} & t_{z,0} \in \{0, 1, \dots, N-1\} \text{ bada} \\ 0 & t_{z,0} = N \text{ bada} \end{cases}$$

$$R_{a_z} := \begin{cases} \frac{-c \left(1 - \sum_{m^{z,(0)} > t_{z,0}} q_{m^{z,(0)}} \right) + \sum_{m^{z,(0)} > t_{z,0}} q_{m^{z,(0)}} R_{(a_z + r_{m^{z,(0)}}^{z,(0)}, m^{z,(0)})}}{\sum_{m^{z,(0)} > t_{z,0}} q_{m^{z,(0)}}} & t_{z,0} \in \{0, 1, \dots, N-1\} \text{ bada} \\ \lim_{\beta \rightarrow 1} \frac{-c}{1 - \beta} & t_{z,0} = N \text{ bada} \end{cases}$$

eta

$$W_{(a_z, m^{z,(0)})} := 1 + \frac{1 - \mu_{(a_z, m^{z,(0)})}}{\sum_{m^{z,(1)} > t_{z,1}} q_{m^{z,(1)}}} \cdot \sum_{i=0}^{I(a_z)} \left[\left(\prod_{j=1}^i \frac{\sum_{m^{z,(j)} > t_{z,j}} q_{m^{z,(j)}} \cdot \left(1 - \mu_{\left(a_z + \sum_{k=0}^{j-1} r_{m^{z,(k)}}^{z,(k)}, m^{z,(j)} \right)} \right)}{\sum_{m^{z,(j+1)} > t_{z,j+1}} q_{m^{z,(j+1)}}} \right) \cdot \sum_{m^{z,(i+1)} > t_{z,i+1}} q_{m^{z,(i+1)}} \right]$$

$$R_{(a_z, m^{z,(0)})} := -c \left(1 - \mu_{(a_z, m^{z,(0)})} \right) + \frac{c \left(1 - \mu_{(a_z, m^{z,(0)})} \right)}{\sum_{m^{z,(1)} > t_{z,1}} q_{m^{z,(1)}}} \cdot \sum_{i=0}^{I(a_z)} \left[\left(\prod_{j=1}^i \frac{\sum_{m^{z,(j)} > t_{z,j}} q_{m^{z,(j)}} \cdot \left(1 - \mu_{\left(a_z + \sum_{k=0}^{j-1} r_{m^{z,(k)}}^{z,(k)}, m^{z,(j)} \right)} \right)}{\sum_{m^{z,(j+1)} > t_{z,j+1}} q_{m^{z,(j+1)}}} \right) \cdot \frac{1 - \sum_{m^{z,(i+1)} > t_{z,i+1}} q_{m^{z,(i+1)}} \cdot \mu_{\left(a_z + \sum_{k=0}^i r_{m^{z,(k)}}^{z,(k)}, m^{z,(i+1)} \right)}}{L(a_z, i)} \right]$$

non $t_{z,i} \in \{0, 1, \dots, N\}$ atalaseek $t_{z,i} < m^{(i)} \in \{1, 2, \dots, N\}$ betetzen denerako $(a_z + \sum_{k=0}^{i-1} r_{m^{z,(k)}}^{z,(k)}, m^{z,(i)})$ egoeretan zerbitzatzea optimoa dela adierazten duten. Bestalde, $I(a_z)$, $t_{z,i} = N$ betetzen duen i baliorik txikiena da, eta $L(a_z, i)$ 1 da $i \neq I(a_z)$ denean eta $1 - \beta$ da (tamaina banaketa motaren arabera) $i = I(a_z)$ denean.

Channel-aware-ak diren $t_{z,i}$ atalaseen balioak eta $I(a_z)$ eta $L(a_z, i)$ aldagaiak fluxu-tamaina banaketaren arabekoak dira. Eskuratutako zerbitzu maila infinitu kontside-

ratzen dituen DGHR motako kasuan, $L(a_z, I(a_z)) = 1$ eta $I(a_z) = +\infty$ izango dira; aitzitik, eskuratutako zerbitzu maila kopurua finitua bada $I(a_z)$ finitua da eta $L(a_z, I(a_z)) = 1 - \beta$ da.

5.1 Teorema. *Fluxu-tamaina banaketa orokorrerako lortutako Whittle indizearen adierazpena banaketa esponenzialaren kasurako PI indizea ((5.12), [Ayesta'2010]) dela frogatzen da:*

$$v_{(a,n)}^* = v_n^* = PI = \frac{c\mu_n}{\sum_{m>n} q_m(\mu_m - \mu_n)} \quad (5.12)$$

Frogapena. Frogapena A Eranskinen A.2 atalean azaltzen da. □

Whittle indizeen balioaren konputaziorako 5.1 Proposizioko formula erabiltzea konputazionalki kostu handikoa da, ez tratagarria ere izan daitekeelarik. Gainera, AG-algoritmoaren antzera, eskuratutako zerbitzu maila kopurua infinitua denean $I(a_z) = +\infty$ izateak eskuratutako zerbitzu balio posible infinituen multzoa mugatu behar izatea eragiten du, indizeen balioan zehaztasuna galtzen delarik.

Hurrengo azpi-atalean DGHR motakoak diren Pareto tamaina banaketetan zentratuko gara era sakonean.

5.1.3.2.2 DGHR kasurako partikularizazioa

Aurreko azpi-atalean Whittle indizeen balioa espresio analitiko nahiko konplikatu baten bidez adierazi da. Jarraian Pareto fluxu-tamaina banaketentzat adierazpen sinplifikatu bat lortzeari ekingo zaio, zeinak denbora errealean indizeen konputazioa erraztuko duen.

Politika optimoak estruktura berezia badu, honetaz baliatu gaitezke indizearen espresioa sinplifikatzeko. Era honetan, (5.8) espresioan adierazten diren (a, n) egoera baten Whittle indizearen kalkulurako beharrezkoak diren (a, m) eta $(a + r_n, m)$ egoerak aktiboak edo pasiboak diren zehaztu behar da. Ondorioztatutako propietateen arabera, batetik, eskuratutako zerbitzu berdinentzat kanal kondizio hobean indizearen balioa altuagoa da, eta hortaz, (a, n) egoeraren indizearen kalkuluan, a eskuratutako zerbitzua duten egoeren artean kanal kondizioa n baino handiagoa bada egoera horiek aktiboak izango dira, eta kanal kondizioa txikiagoa izatekotan, berriz, pasiboak; hau da, $(a, m) \in \mathcal{F} \quad \forall m > n$ eta $(a, m) \notin \mathcal{F} \quad \forall m \leq n$ betetzen dira. Bestetik, DGHR motakoa den Pareto banaketa batentzat kanal kondizio bakoitzerako Whittle indizearen balioa beherakorra da eskuratutako zerbitzuarekiko, eta beraz, a edo a baino handiagoak diren eskuratutako zerbitzua duten eta n edo n baino txikiagoak diren egoerak pasiboak izango dira; alegia, $(a + r_n, m) \notin \mathcal{F} \quad \forall m \leq n$ betetzen da. Dena den, posiblea da n baino hobea den kanal kondizio bat duen eta a baino handiagoa den eskuratutako zerbitzua

duen egoera batean zerbitzatzea interesatzea. DGHR banaketa batentzat $t_{z,i} \leq t_{z,i+1}$ da, $i \rightarrow \infty$ limitean atalase horren balioa N izanik, baina atalase horiek ezin dira alde zurreratik zehaztu. Horrela, eskuratutako zerbitzua a baino handiagoa eta n baino handiagoak diren m kanal kondizio duten egoerak, hau da, $(a + r_n, m) \quad \forall m > n$ egoerak, zein eskuratutako zerbitzu maila eta kanal kondiziotik aurrera pasiboak edo aktiboak diren ezin da aurretiaz jakin.

Hala eta guztiz ere, kanal kondizio onenean zerbitzatze multzoa erabat zehaztuta dago, ikusitako indizearen propietateen arabera, (a, N) egoera baten Whittle indizean eragina duten egoera guztiak pasiboak baitira, indizearen balioan eragina duten egoeretan eskuratutako zerbitzu mailak berdinak edo altuagoak izanik kanal kondizioaren hobekuntzarik ez baitago.

5.2 Proposizioa. *Kanal kondizio onenean Pareto tamaina banaketa duten fluxuentzako (5.6) problemarako Whittle indizea (5.13) da:*

$$v_{(a,N)}^* = \lim_{\beta \rightarrow 1} \frac{c\mu(a,N)}{1 - \beta} = +\infty \quad (5.13)$$

Frogapena. N kanal kondiziorako edozein a eskuratutako zerbitzu mailarako $\mathcal{F} = \emptyset$ da. Era honetan, 5.1 Proposizioeko espresioak erabiltzen dira, kasu honetarako $W_{a_z} = 0$ eta $R_{a_z} = \lim_{\beta \rightarrow 1} \frac{-c}{1 - \beta}$ izanik. Lan eta sari termino horiek (5.11) adierazpenean ordezkatzuz (5.13) lortzen da. \square

(5.13) definizioaren arabera kanal onerako Whittle indizearen balioa infinitua da, [Ayesta'2010] lanean tamaina esponenzialentzat lortzen den emaitza bera erdiesten delarik. Dena den, kanal onenaren kasurako Whittle indizearen adierazpen erraza lortu bada ere, zerbitzatze multzoaren estruktura ez argiaren inguruan arestian ikusitakoaren arabera, gainontzeko kanal kondizioetarako Pareto banaketarako Whittle indizearen adierazpen orokorra sinplifikatzea ez da posible.

Dena den, aurreko emaitzan oinarrituz, jarraian bi kanal kondizioko kasuan Whittle indizearen adierazpena aztertuko da. Bi kanal kondizioko kasua *Gilbert-Elliott* ereduarekin bat dator. Kanal eredu hori wireless kanalen testuinguruan zeharo aztertu da, zeina [Gilbert'1960] eta [Elliott'1963] lanen konbinaziotik eratortzen den, eta ON/OFF kanalen kasu berezia barne hartzen du. Hortaz, bi kanal egoerako kasua interesa handikoa da, eta gainera, kanal aldakorreko problemaren oinarritzko ezagutzak finkatzeko ezinbestekoa izango da.

5.3 Proposizioan azaltzen denaren arabera, bi kanal kondizio soilik kontsideratzen badira kanal txarrerako Whittle indizearen adierazpena ere sinplifikatzea lortzen da. Kasu honetan, N kanalentzat $(a + r_n, m) \quad \forall m > n$ egoerak pasiboak edo aktiboak diren

ezezaguna bada ere, bi kanalentzat $(a + r_1, 2)$ egoera aktiboa izango da, edozein esku-ratutako zerbitzurako kanal onenean aktibotasuna ematen baita. Bi kanal kondiziorako kanal txarrenaren indizearen adierazpena zuzenean lortzen da 5.1 Proposizioeko espresioak sinplifikatuz.

5.3 Proposizioa. $z \in \{1, 2\}$ guztientzat atalase balioak $t_{z,i} = 1$ badira eta $0 \leq i \leq I(a_z) = +\infty$ bada, orduan (5.6) problemarako Pareto tamaina banaketa duten fluxuentzat Whittle indizea deskontu gabeko kasurako honakoa da:

$$v_{(a,1)}^* = \frac{c\mu_{(a,1)} + (1 - \mu_{(a,1)})R_1 - R_2}{1 + (1 - \mu_{(a,1)})W_1 - W_2} \quad (5.14)$$

non, $z \in \{1, 2\}$ denerako,

$$W_z = 1 + \sum_{i=0}^{\infty} \prod_{j=0}^i (1 - \mu_{(a_z + jr_2, 2)})$$

$$R_z = \frac{-c}{q_2} \cdot \left(1 - q_2\mu_{(a_z, 2)} + \sum_{i=0}^{\infty} \left(\prod_{j=0}^i (1 - \mu_{(a_z + jr_2, 2)}) \right) \cdot (1 - q_2\mu_{(a_z + (i+1)r_2, 2)}) \right)$$

Beraz, bi kanal egoera kontsideratzen direnean kanal txarrerako lortutako Whittle indizearen adierazpena konputazionalki eskuragarria da, doitasun maila onargarri bateraino. Horrela, bi kanalen kasurako Pareto banaketentzat proposatzen den Whittle indize erregelaren funtzionamendua 5.1 Definizioan azaltzen da.

5.1 Definizioa. Bi kanalen kasurako Pareto tamaina banaketa duten fluxuentzat **Whittle indize erregela** honakoan datza: erabakitze une bakoitzean,

- erabiltzailerren bat kanal onean egotekotan, $c\mu_{(a,2)}$ baliorik altuena duen erabiltzailea zerbitzatu (berdinketa hauste hori (5.13) adierazpena $(1 - \beta)$ terminoarekin biderkatuz lortzen da);
- kanal onean erabiltzailerik ez badago, $v_{(a,1)}^*$ baliorik altuena duen erabiltzailea zerbitzatu (5.14) erabiliz.

Heuristika horrek ondo funtzionatzen duela bermatzeko bere errendimendua aztertuko da geroago 6. Kapitulan.

Hala ere, gaur egungo wireless teknologiek bi kanal kapazitate baino gehiago aurkezten dituzte, eta beraz, N kanal kondizioetarako Whittle indizearen adierazpen sinplifikatua lortzea axola handikoa da. N kanaleko ereduak duen garrantzia ikusita, hurrengo azpi-sekzioan N kanalen kasurako Whittle indizea sinplifikatzeko hurbilketa bat proposatuko da.

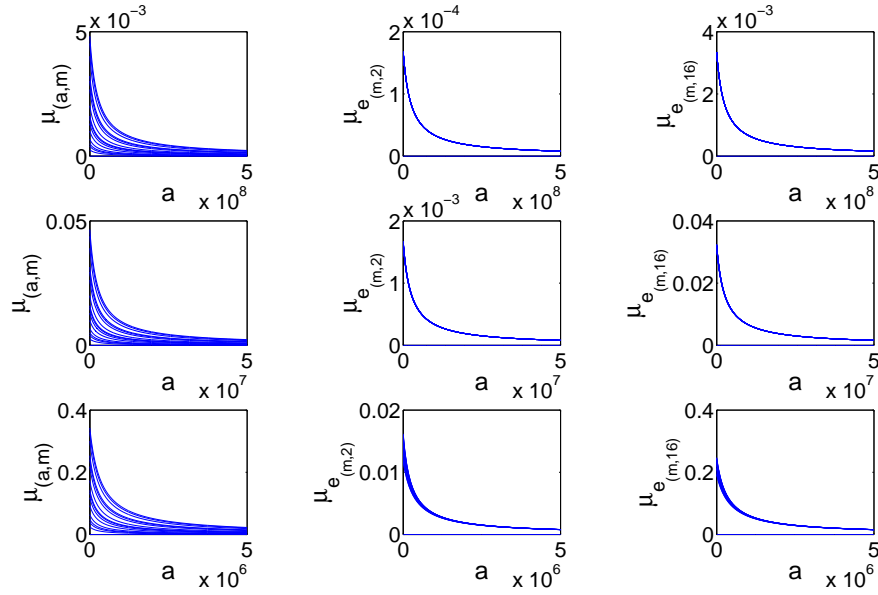
5.1.3.2.3 Whittle indizearen hurbilketan oinarritutako indize erregelaren proposamena

Aurreko azpi-ataletan aurkeztu denaren arabera, N kanal kondizioetarako Whittle indizearen adierazpena konputazionalki eta analitikoki ez tratagarria da. Era honetan, jarraian indize horren adierazpena sinplifikatzeko zenbait hurbilketa planteatuko dira, Whittle indizerako soluzio hurbildua proposatuz. Indize sinplifikatu hori DGHR motako tamaina banaketa funtzioetara partikularizatuko da, Pareto banaketara hain zuzen ere.

Hasteko, zerbitzatze multzoaren estruktura zehatza definituko dugu. Lehenagoko puntuetan DGHR banaketen inguruan ondorioztatutakoagatik, (a, n) egoera baten Whittle indizea lortzerakoan $(a, m \leq n) \cup (a + r_n, m \leq n)$ egoerak pasiboak eta $(a, m > n)$ egoerak aktiboak direla ezaguna bada ere, $(a + r_n, m > n)$ egoeren aktibotasuna aurretiaz ez da jakina. Dena den, demagun edozein $l = 1, 2, \dots, N$ baliorako $\mu_{(a,m)} \approx \mu_{(a+r_l,m)}$ dela. Modu honetan, $(a, m > n)$ egoerak aktiboak direla jakinda, $\mu_{(a,m)} \approx \mu_{(a+r_n,m)}$ bada, $(a + r_n, m > n)$ egoerak ere aktiboak direla suposa dezakegu.

Bukatzeko probabilitateen hurbilketa horren errorea, $\mu_{e(m,l)}$, halaxe definitzen dugu: $\mu_{e(m,l)} = 1 - \mu_{(a+r_l,m)} / \mu_{(a,m)}$. 5.7 Irudian hurbilketa horri dagokion errore analisia aurkezten da, zeinetan batz besteko tamaina ezberdina duten hiru Pareto konfigurazio desberdinetarako (50 Mbit, 5 Mbit eta 0.5 Mbit, goitik behera, kasu guztietan $\alpha = 1.5$ izanik) kanal kondizio ezberdinetarako μ -aren bilakaera eskuratutako zerbitzuarekiko (ezkerreko grafikoak), μ -ren errorea nulua ez den kanal kondizio txarrenarekiko (erdiko grafikoak) eta μ -ren errorea kanal kondizio onenarekiko (eskuineko grafikoak) azaltzen diren. Erabiltzen diren transmisio tasak wireless konfigurazio tipiko baten maneatutakoak dira, 6.7 Taulan aurkezten direnak hain zuzen ere, non $N = 16$ den. 5.7 Irudiko grafikoetan beha daitekeenez, lehenengo bi tamaina konfigurazioetan emaitza nahiko onak lortzen dira, kasurik txarrenean %3 inguruko errorea eskuratzen delarik. Baina hirugarren konfiguraziorako ikus daitekeen bezala, batz besteko tamaina gehiago txikiagotzen den heinean errorea nabarmenki handitzen da, errore handiena sortzen duen $\mu_{e(2,16)}$ kasurako eskuratutako zerbitzua batz besteko tamaina denean errorea %10 ingurukoa izanik. Dena den, hurbilketa horren erroreak ondoriozko efektuek errendimenduan eragin oso handirik ez dutela egiaztatuko da geroago errendimenduaren azterketarako atalean.

Aurkeztutako μ -aren hurbilketa erabilia behin zerbitzatze multzoa zehaztuta, 5.1 Proposizioko sari eta lan osagaiak sinplifikatzeari ekingo zaio. Demagun arestian proposatutako μ -aren hurbilketak $t_{1,i} \approx t_{2,i}$ izatea eragiten duela. Molde honetan, $\mu_{(a,m)} \approx \mu_{(a+r_n,m)}$ zein $t_{1,i} \approx t_{2,i}$ direla kontsideratzen badugu, $R_{(a_1,m^1,(0))} \approx R_{(a_2,m^2,(0))}$ eta $W_{(a_1,m^1,(0))} \approx W_{(a_2,m^2,(0))}$ dira, eta ondorioz, $R_{a_2} \approx R_{a_1} = R_a$ eta $W_{a_2} \approx W_{a_1} = W_a$

5.7 Irudia: μ errorea.

direla esanenez. Hurbilketa horiek erabilia Whittle indizearen (5.8) adierazpena ondorengo espresiora, $\tilde{v}_{(a,n)}^*$ denominatuko duguna, sinplifikatzen da:

$$\tilde{v}_{(a,n)}^* = \frac{\beta\mu_{(a,n)}(c - R_a)}{1 - \beta\mu_{(a,n)}W_a} \quad (5.15)$$

Are gehiago, aurreko hurbilketa horiek edozein l kanal egoeraren eskuratutako zerbitzu gehikuntzara orokortu daitezke, $R_a = \sum_m q_m R_{(a,m)} \approx \sum_m q_m R_{(a+r_l,m)}$ eta $W_a = \sum_m q_m W_{(a,m)} \approx \sum_m q_m W_{(a+r_l,m)}$ izatea lortuz. Horrela, azkenengo hurbilketa hori aurreko suposizio zein hurbilketekin batera erabilia, 5.4 Proposizioan azaltzen den *Attained Service dependant Potential Improvement* (ASPI) deituko dugun Whittle indizearen hurbilketa lortzen da. Whittle indizean oinarritutako forma itxia duen indize horren adierazpena lortzeko ebazpide matematikoa A Eranskinen A.3 atalean aurkezten da.

5.4 Proposizioa. *Pareto tamaina banaketa duten fluxuentzat ASPI indizea (5.16) da:*

$$ASPI = \tilde{v}_{(a,n)}^* = \frac{c\mu_{(a,n)}}{\sum_{m>n} q_m (\mu_{(a,m)} - \mu_{(a,n)})} \quad (5.16)$$

(5.16) adierazpenean beha daitekeenez, lortutako ASPI indizea konputazionalki tragarria da. Planifikazio estrategia hori tamainan oinarritutako eta channel-aware poli-

tika bat da, zeina **tamaina banaketaren, kanal kapazitateen eta kanal egoera probabilitateen menpekoa** den. Eskuratutako espresio horrek antza handia du PI-ren adierazpenarekin (5.12), baina banaketa esponentzialentzat ez bezala, gure kasuan eskuratutako zerbitzua kontuan hartzen da. Gainera, hurbildu gabeko Whittle indizean bezala, **kanal kondizio onenean ASPI indizea infinitua** da, izendatzaileko batukaria nulua baita. Bestalde, **kanal kondizioa onena ez izatekotan, indizearen balioa uneko bukatzeko probabilitatearen eta bukatzeko probabilitatearen hobekuntza itxaropenaren arteko ratioa** da.

Beraz, laburbilduz, proposatutako ASPI indize erregela 5.2 Definizioan biltzen da.

5.2 Definizioa. ASPI indize erregela honakoan datza: erabakitze une bakoitzean,

- erabiltzaileren bat bere kanal onenean egotekotan, $c\mu_{(a,N)}$ baliorik altuena duen erabiltzailea zerbitzatu (berdinketa hauste hori (5.13) adierazpena $(1 - \beta)$ terminoarekin biderkatuz lortzen da);
- bere kanal kondizio onenean erabiltzailerik ez badago, $\frac{c\mu_{(a,n)}}{\sum_{m>n} q_m(\mu_{(a,m)} - \mu_{(a,n)})}$ baliorik altuena duen erabiltzailea zerbitzatu ((5.16) erabilita).

Ondorioz, bai tamainaren bai kanalaren menpekoa den ASPI indize erregela era errazean inplementa eta erabili daiteke. Bestalde, proposatutako Whittle indizearen hurbilketa heuristika horren errendimendua aproposa dela 6. Kapituluaren egiaztatuko da.

5.2 QoE-aware indize erregelaren proposamena

Atal honen helburua denboran aldakorra den kanalean QoE-a maximizatzea helburutzat duen planifikaziorako indize erregela proposatzea da. Horretarako, lehenik eta behin, kanal kapazitatea denboran aldakorra denerako QoE-aware scheduling problema hori 5.2.1 puntuan karakterizatuko da. Ondoren, 5.2.2 azpi-atalean, 3.2 puntuan proposatutako QoE-aware MDP eredua kanal aldakorrera hedatuko da. Proposatutako MDP eredu berri horri indize erregela motako soluzioa emango zaio 5.2.3 azpi-atalean, eta bertan erabilitako ebazpen metodoak 5.1 atalean kanal aldakorrean atzerapenaren minimizazio problemarako indize erregela lortzeko erabilitako Whittle-n oinarritutako metodoan du oinarria.

5.2.1 Problemaren deskribapena

Denboran aldakorra den kanalean batz besteko QoE-a maximizatzeko helburua duen scheduling problema aztertuko da. Gure ikasketa edozein kanal aldakorreko testuingurura aplikagarria izanda, haririk gabeko sareetan zentratutako gara, wireless zelula bakar baten beheranzko kanalean hain zuzen ere. Era honetan, TTI bakoitzaren hasieran, oinarri-estazioan dagoen planifikatzaileak zein erabiltzailearen trafiko fluxu transmititzeko erabakiak hartuko ditu.

Sistemako k erabiltzaile bakoitza berak eskatutako trafiko fluxuarekin, bere QoE ezaugarriarekin eta dagokion wireless kanal dedikatuarekin lotzen da. Fluxu tamainek Pareto banaketa (3.1) jarraitzen dutela eta independenteki banatuta daudela suposatzen da. Erabilitako scheduling algoritmoaren menpekoea den erabiltzaile fluxu baten bit guztiak kanalera transmititzeko denborak erabiltzaileak hautemandako kalitatean eragin zuzena du, eta atzerapen hori kalitate subjektiboaren distortsio kausa nagusia dela kontsideratzen da. Gisa honetan, erabiltzailearen QoE-a atzerapenaren menpekoea den (3.3) MOS funtzioaren bidez karakterizatzen da. Eredu analitikoan erabiltzaile fluxuen etorrera berririk kontsideratzen ez bada ere, planifikazio estrategien errendimendu analisia heldueren presentzian egingo da.

Kanalaren ezaugarri dagokienez, 5.1 ataleko kanal eredua kontsideratzen da. Modu honetan, k erabiltzaile bati lotutako kanalak $\mathcal{N} := \{1, 2, \dots, N_k\}$ kanal kondizioen artean korrelaziorik ez duen banaketa baten arabera eboluzionatzen du, gainontzeko erabiltzaileen independenteki. Beraz, n kanal egoeran egoteko $q_{k,n}$ kanal egoera-probabilitateak kanal kondizioen egoera egonkorreko banaketa bezala ikus daitezke, non $\sum_{n \in \mathcal{N}} q_{k,n} = 1$ den eta n egoeran $r_{k,n}$ bit transmititzen direlarik kanalera, $s_{k,n}$ transmisio tasak $s_{k,1} \leq s_{k,2} \leq \dots \leq s_{k,N_k}$ izanik.

Bestalde, Pareto fluxu tamainak kontsideratzen direnez, fluxuaren transmisioa bu-

katzeko probabilitatea, $\mu_{(a,n)}$, eskuratutako zerbitzuaren eta zerbitzu tasaren menpekota den DGHR motakoa den hazard rate funtzio baten bidez karakterizatzen da (begiratu (5.2) eta (5.1)).

Bestaldetik, scheduler-aren xedea bataz besteko MOS-a maximizatzea izanik, (3.5) optimizazio probleman adierazten dena, Π planifikazio politika onargarrien multzoak aurreratu gabetasun eta channel-awareness ezaugarriak izateaz gain, atzerapenaren menpekotasun zein QoE-awareness karakteristikak ditu baita. Molde honetan, k erabitzaille bakoitzerako, memorian gordeta dagoen eskuratutako zerbitzua eta jasotako CQI-ak aztertzeaz aparte, fluxu batek sisteman daraman denbora zein MOS funtzioaren ezaugarriak (atzerapen-atalaseak eta honen ondoriozko koefizienteak) ezagunak dira planifikatzailearentzat. Gainera, zerbitzu unitarioa eta desokupazio modua onartzen dira.

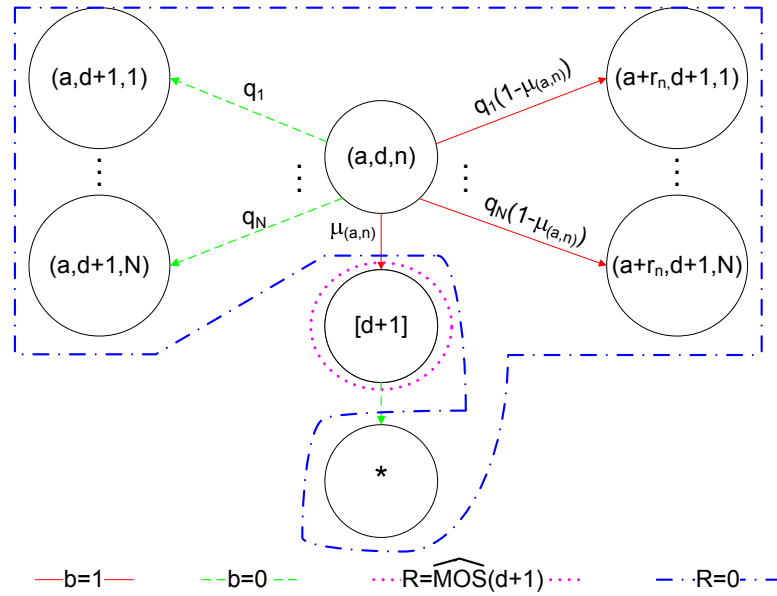
5.2.2 QoE-aware MDP ereduaren hedapena

Sekzio honetan aurreko 5.2.1 puntuan aurkeztutako kanal kapazitatea aldakorra denean bataz besteko QoE-aren maximizaziorako scheduling problema MDP markoan formulatuko da. Proposatuko den QoE-aware MDP ereduak 3.2 atalean proposatutakoan du oinarria, eredu berria aurrekoaren kanal aldakorrerako hedapena izanik hain zuzen ere.

Era honetan, bataz besteko MOS-a maximizatzeko helburuarekin, sariak kanal konstanterako definitutako era berdinean definituko dira, atzerapenaren menpekota den QoE-aware saria behin fluxua transmisioa bukatutakoan soilik ematen delarik. Hala ere, oinarritzko QoE-aware ereduaren egoerak bidimentsionalak dira, dimentsioak eskuratutako zerbitzua eta atzerapena izanik, eta kanal kapazitatearen aldakortasun denborala kontenplatzeko oraingoan channel-awareness-a ere kontuan hartzea ezinbestekoa da. Hori dela eta, 5.1 ataleko kanal aldakorra denerako bataz besteko atzerapenaren minimizaziorako problemaren MDP formulazioan bezalaxe, egoera osagai berri bezala kanal egoera, n , sartuko da. Modu honetan, oro har hiru dimentsiotako egoerak izango ditugu, (a, d, n) egoerak preseski. Horrez gain, jatorritzko QoE-aware ereduak, 5.1.2.1 puntuko kanal aldakorrerako ereduaren ez bezala, ez du kanal egoeraren aldaketa denboran zehar kontenplatzen, zeina trantsizio probabilitateetan kanal kondizioen probabilitateak sartuz lortzen den.

Beraz, atal honetan proposatuko den eredu analitikoa 3.2 eta 5.1.2.1 MDP ereduaren nahasketa da. Batetik, **oinarritzko QoE-aware MDP ereduko sariaren definizioa zein atzerapen osagaia egoeraren definizioan kontuan hartzen ditu**, eta bestetik, **aurreko kanal aldakorreko problemako kanal kondizio osagaia egoeraren definizioan zein trantsizio probabilitateetan kanal kondizioen probabilitateak sartzen ditu**.

Laburbilduz, 5.8 Irudian erabiltzaile baten QoE-aware MDP eredu berriaren egoera diagramaren zati bat adierazten da, zeinak eredu hibrido berri horren inguruan esandakoa laburbiltzen duen. Jarraian kanala aldakorra denean QoE-aware MDP eredu proposamenaren elementuak era zehatzean deskribatzen dira k erabiltzaile bakoitzarentzat.



5.8 Irudia: Erabiltzaile baten QoE-aware egoera diagrama berriaren zatia.

k erabiltzaile bati dagokion \mathcal{B} akzio-espazioa bitarra da; 0 akzioak erabiltzaile hori ez zerbitzatzea adierazten du, eta 1 akzioa hautatzen bada, berriz, n kanal egoeran dagoen erabiltzaile horren $r_{k,n}$ bit kanalera transmititzen dira. Bestalde, k erabiltzaile bakoitza $(\mathcal{S}_k, (\mathbf{R}_{k,s}^b)_{b \in \mathcal{B}}, (\mathbf{W}_{k,s}^b)_{b \in \mathcal{B}}, (\mathbf{P}_{k,s}^b)_{b \in \mathcal{B}})$ tuplaren bidez definitzen da. Aurreko elementu horiek horrelaxe definitzen dira:

- $\mathcal{S}_k = (\mathcal{A}_k \times \mathcal{D}_k \times \{1, 2, \dots, N_k\}) \cup \{[\mathcal{D}_k + 1]\} \cup \{[*]\}$ egoera-espazioa k erabiltzaile baten s egoeren multzoa da, zeinetan hiru egoera mota desberdintzen ditugun:
 - Fluxu transmisioa bukatugabeko egoeren multzoa: Egoera hauek hiru dimentsio dituzte, non $s = (a, d, n)$ egoerak ditugun, $a \in \mathcal{A}_k$ eskuratutako zerbitzu maila, $d \in \mathcal{D}_k$ atzerapen maila, eta $n \in \{1, 2, \dots, N_k\}$ kanal kondizio elementuez osatuak. Eskuratutako zerbitzu maila horiei dagozkien eskuratutako zerbitzuak nulua ez den lehenengo r_n transmisio tasaren multiploak dira, eta atzerapen maila dagozkien atzerapenak, berriz, TTI-aren multiploak.
 - Sari egoerak: $s = [d]$ egoeretara fluxuaren transmisioa bukatutakoan heltzen da, atzerapenaren menpekoak soilik diren egoera horietan QoE-aware saria

ematen delarik.

– Bukaerako egoera: $s = [*]$ egoera xurgatzailea da.

- $R_k^b := (R_{k,s}^b)_{s \in S_k}$, non $R_{k,s}^b$ TTI baten hasieran b akzioa hautatzen bada s egoeran dagoen k erabiltzailearentzat, erabiltzaile horrek jasotako une-bateko sari itxaropena den,

$$R_{k,(a,d,n)}^b = 0, \quad R_{k,[d]}^b = \widehat{\text{MOS}}(d+1), \quad R_{k,[*]}^b = 0;$$

- $W_k^b := (W_{k,s}^b)_{s \in S_k}$, non $W_{k,s}^b$ TTI baten hasieran b akzioa aukeratzen bada s egoeran dagoen k erabiltzailearentzat, erabiltzaile horrek egindako une-bateko lan itxaropena den,

$$W_{k,s}^0 = 0, \quad W_{k,s}^1 = 1;$$

- $P_k^b := (p_k^b(s, s'))_{s, s' \in S_k}$, non $p_k^b(s, s')$ TTI baten hasieran b akzioa aukeratzen bada k erabiltzailearentzat, erabiltzaile hori s egoeratik s' egoerara mugitzeko probabilitatea den,

$$\begin{aligned} p_k^0((a, d, n), (a, d+1, m)) &= q_{k,m}, \\ p_k^1((a, d, n), (a+r_n, d+1, m)) &= q_{k,m} \cdot (1 - \mu_{k,(a,n)}), \\ p_k^1((a, d, n), [d+1]) &= \mu_{k,(a,n)}, \quad p_k^0([d], [*]) = p_k^0([*], [*]) = 1; \end{aligned}$$

Horrela, k erabiltzailearen dinamika $s_k(t) \in S_k$ egoera-prozesuak eta $b_k(t) \in \mathcal{B}$ akzio-prozesuak kapturatzen dute. Gainera, azpimarratzekoa da proposatutako MDP eredu berriak restless ezaugarria duela, TTI batean akzio nulua aukeratzen bada ere egoera aldaketak ematen baitira bai atzerapenaren gehikuntzaren bai kanalaren eboluzio estokastikoaren ondorioz.

Bestaldetik, batuz besteko MOS-a maximizatzea helburutzat duen (3.5) optimizazio problemari lotutako kanal aldakorrerako MDP ereduari dagokion QoE-aren maximizazio problema honako eran idatz daiteke:

$$\begin{aligned} \max_{\pi \in \Pi} \mathbb{E}_0^\pi \left[\sum_{t=0}^{\infty} \sum_{k \in \mathcal{K}} R_{k,((a_k(t), d_k(t), n_k(t)) \cup [d_k(t)])}^{b_k(t)} \right] \\ \sum_{k \in \mathcal{K}} b_k(t) = 1 \quad \forall t \end{aligned} \quad (5.17)$$

Dena den, (5.17) problema era optimoan ebaztea ez da posible orokorrean. Batetik, kanal kapazitatea konstantea denerako QoE-aware ebazpen zehatza lortzearen ezinta-

suna agerian utzi da 3.3 atalean, eta beraz, kanal aldakorreko eredua konplexuagoa izanik soluzio optimoa lortzea ez da bideragarria kasu honetan. Bestetik, jakina da antzeko problemetan esleipen baldintza horrek problemaren ebazpena ez tratagarria izatea eragiten duela [Whittle'1988], eta hortaz, gure kasuan hiru dimentsioetako egoerak izanda horren soluzio optimoa aurkitzea are zailagoa edota ezinezkoa da. Era honetan, kanal kapazitatea aldakorra denean bataz besteko MOS-a maximizatzea helburutzat duen problemarako soluzio optimoa lortzearen ezinezkotasuna ikusita, gure problemarako soluzio hurbildua lortzeari ekingo zaio. Horretarako, hurrengo atalean Whittle-n metodoan oinarrituta aurkeztutako QoE-aren optimizazio problemarako heuristika bat proposatuko da.

5.2.3 Whittle-n oinarritutako QoE-aware indize erregelaren proposamena

Atal honetan Whittle-n metodoan oinarrituz (5.17) problemari Whittle indize erregela motako soluzio hurbildua emango zaio. Ohartu (a, d, n) egoeren indizeak soilik interesatzen zaizkigula, behin fluxuaren transmisioa bukatuta planifikazioak zentzurik ez baitu oraingoan ere. Era honetan, (5.17) problemari Whittle-n sinplifikazioa [Whittle'1988] zein lagrangiar metodoak [Visweswaran'2009] aplikatuta, problema hori guztirako sari eta lan itxaropenen eta \mathcal{F} zerbitzatzeko politikaren menpekoea den erabiltzaile bakarreko v prezioan oinarritutako (5.18) adierazpenaren bidez berridatz daiteke:

$$\max_{\mathcal{F} \subseteq S_k} \mathbb{R}_{k,(a,d,n)}^{\mathcal{F}} - v \mathbb{W}_{k,(a,d,n)}^{\mathcal{F}} \quad (5.18)$$

5.2 Konjektura. (5.18) problema indexablea da.

Gure ereduaren konplexutasuna dela eta (5.18) problemaren indexabilitatea frogatzea ez da ataza erraza. Modu honetan, 5.2 Konjektura onartzen da, eta beraz, k erabiltzailearen (a, d, n) egoera bakoitzerako Whittle indizea existitzen dela suposatzen dugu. Hemendik aurrera k erabiltzaileari dagozkion etiketak kenduko dira. Bestalde, azpimarratzekoa da deskonturik gabeko, $\beta = 1$, kasua aztertuko dela, sarien ahultzea MOS funtzioak berak gidatzea interesatzen baitzaigu. Dena den, analisi matematikoa deskontuko kasurako egingo da, eta ondoren, $\beta \rightarrow 1$ limitea aplikatu.

Whittle indizearen definizioari jarraituta, (2.8), (5.18) problemarako lortzen den Whittle indizea, $v_{(a,d,n)}^*$, horrela idatz daiteke:

$$v_{(a,d,n)}^* = v_{(a,d,n)}^{\mathcal{F}} = \frac{\mathbb{R}_{(a,d,n)}^{\langle 1, \mathcal{F} \rangle} - \mathbb{R}_{(a,d,n)}^{\langle 0, \mathcal{F} \rangle}}{\mathbb{W}_{(a,d,n)}^{\langle 1, \mathcal{F} \rangle} - \mathbb{W}_{(a,d,n)}^{\langle 0, \mathcal{F} \rangle}} \quad (5.19)$$

5.2 Lema. Edozein (a, d, n) egoerarako eta edozein \mathcal{F} politikarako ondorengoa lortzen da:

$$v_{(a,d,n)}^{\mathcal{F}} = \frac{\beta[(1 - \mu_{(a,n)}) \sum_{m \in \mathcal{N}} q_m \mathbb{R}_{(a+r_n, d+1, m)}^{\mathcal{F}} + \mu_{(a,n)} \cdot \widehat{\text{MOS}}(d+1) - \sum_{m \in \mathcal{N}} q_m \mathbb{R}_{(a, d+1, m)}^{\mathcal{F}}]}{1 + \beta[(1 - \mu_{(a,n)}) \sum_{m \in \mathcal{N}} q_m \mathbb{W}_{(a+r_n, d+1, m)}^{\mathcal{F}} - \sum_{m \in \mathcal{N}} q_m \mathbb{W}_{(a, d+1, m)}^{\mathcal{F}}]} \quad (5.20)$$

Frogapena. Sari eta lan itxaropenen definizioetatik, honako espresioak lortzen dira:

$$\mathbb{R}_{(a,d,n)}^{\mathcal{F}} = \begin{cases} \mathbb{R}_{(a,d,n)}^{<1, \mathcal{F}>} = \beta[(1 - \mu_{(a,n)}) \sum_{m \in \mathcal{N}} q_m \mathbb{R}_{(a+r_n, d+1, m)}^{\mathcal{F}} + \mu_{(a,n)} \cdot \widehat{\text{MOS}}(d+1)] & (a, d, n) \in \mathcal{F} \\ \mathbb{R}_{(a,d,n)}^{<0, \mathcal{F}>} = \beta \sum_{m \in \mathcal{N}} q_m \mathbb{R}_{(a, d+1, m)}^{\mathcal{F}} & (a, d, n) \notin \mathcal{F} \end{cases} \quad (5.21)$$

$$\mathbb{W}_{(a,d,n)}^{\mathcal{F}} = \begin{cases} \mathbb{W}_{(a,d,n)}^{<1, \mathcal{F}>} = 1 + \beta(1 - \mu_{(a,n)}) \sum_{m \in \mathcal{N}} q_m \mathbb{W}_{(a+r_n, d+1, m)}^{\mathcal{F}} & (a, d, n) \in \mathcal{F} \\ \mathbb{W}_{(a,d,n)}^{<0, \mathcal{F}>} = \beta \sum_{m \in \mathcal{N}} q_m \mathbb{W}_{(a, d+1, m)}^{\mathcal{F}} & (a, d, n) \notin \mathcal{F} \end{cases} \quad (5.22)$$

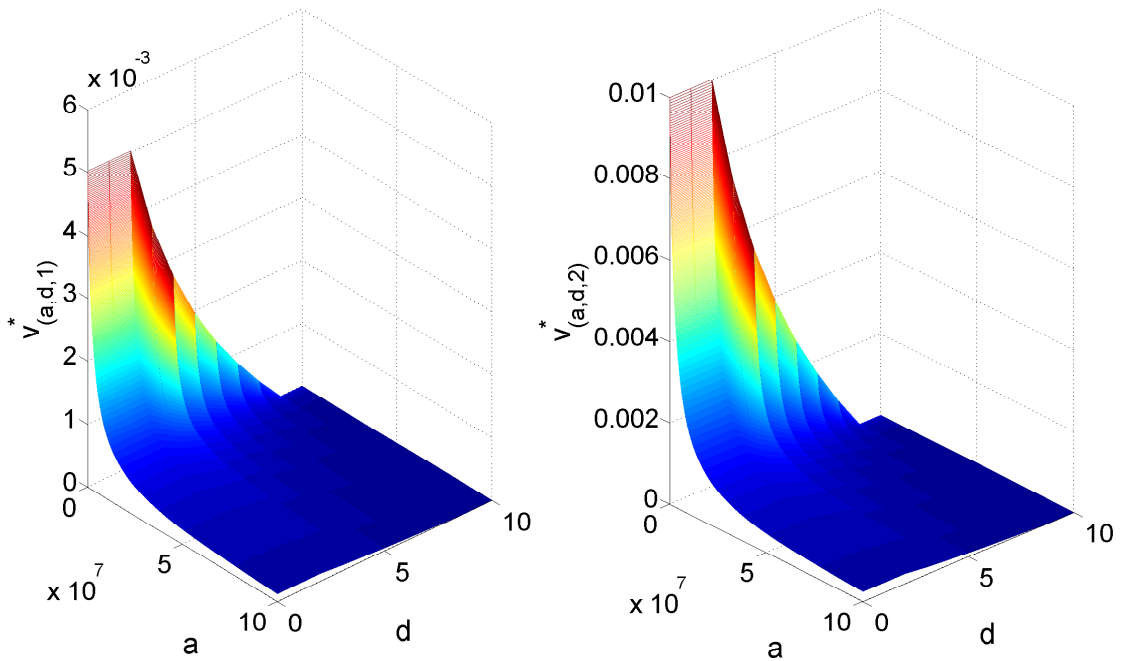
(5.21) eta (5.22) adierazpenak (5.19) espresioan ordezkatzuz $v_{(a,d,n)}^{\mathcal{F}}$ -ren (5.20) formula osatuagoa lortzen da. \square

Dena den, (a, d, n) egoerari dagokion analitikoki tratagarria den (5.19) Whittle indizearen adierazpena lortzeko egoera horren indizearen kalkuluan eragina duten etorkizuneko egoeren \mathcal{F} politika jakitea ezinbestekoa da. Hiru dimentsioetako egoera izateak zerbitzatze multzoaren estruktura asmatzea zailtzen du, orain arte landutako Whittle indize bidimentsionalekin alderatuz. Kanal konstanterako QoE-aren maximizazio problemarako zein kanal aldakorrerako batz besteko atzerapenaren problemarako ondorioztatutako Whittle indizeen propietateen arabera, Whittle indize baten kalkuluan, Pareto tamaintzat kanal kondizio berdineko edo txarragoko egoerak pasiboak izango dira, eskuratutako zerbitzua handitzeak uneko bukatzeko probabilitatea txikiagotzen duelako eta atzerapena handitzeak QoE-a degradatzen baitu. Beste era batean esanda, Pareto tamaintzat kanal kondizio berdina edo txarragoa duen egoera batean, zeinetan eskuratutako zerbitzua handiagoa edota atzerapena handiagoa den, Whittle indizearen balioa baxuagoa da.

Intuizioz aurreko propietate horiek gure problemarako ere ematen direla esan bagezake ere, oraingo ikasketa kasurako \mathcal{AG} -algoritmoa inplementatu da gure problemari dagokion Whittle indizearen ezaugarriak egiaztatzeko. Horretarako, zenbait esperimentu numeriko burutu dira $\beta = 1$ kasurako, zeinetan bai atzerapenaren bai kanal

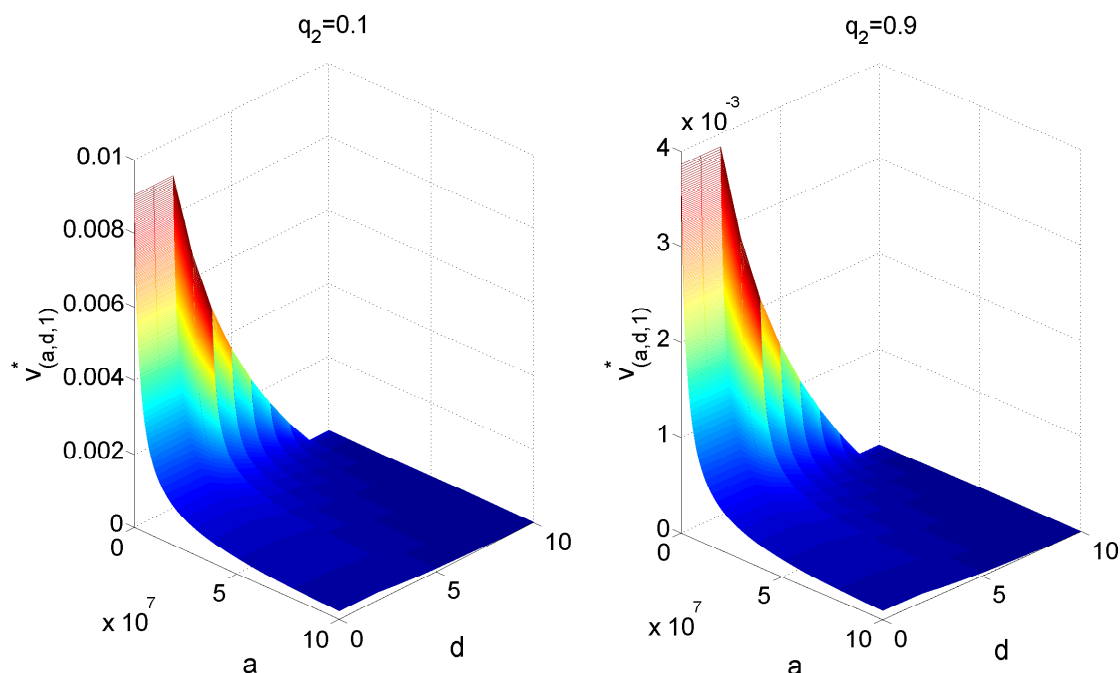
egoeren espazioaren tamaina murriztu egin den algoritmoaren exekuzioa konputazio-nalki eta denborari dagokionez bideragarria izan dadin. Era honetan, bi kanal kondizio eta hamaika atzerapen maila kontsideratu dira soilik agertokietan. Gisa honetan, emaitza esperimentaletatik ateratako ondorio nagusiak honakoak dira:

- (i) Whittle indizearen balioa atzerapenaren, eskuratutako zerbitzuaren eta kanal egoeraren menpekoa da. Horrez gain, 5.9 eta 5.10 Irudietako grafikoetan beha daitekeenez, MOS funtzioaren tartek argi bereizten dira; atzerapenaren goi-atalasetik aurrera indizearen balioa nulua da.
- (ii) Kanal egoera baten barruan, atzerapen maila berdinentzat, Whittle indizeen balioak eskuratutako zerbitzuarekiko beherakorrak dira: $v_{(a,d,m)}^* > v_{(a',d,m)}^* \forall a' > a$. (5.9 eta 5.10 Irudietan ilustratuta).



5.9 Irudia: Whittle indizeak eskuratutako zerbitzuaren eta atzerapenaren menpe bi kanalen kasurako. $\alpha = 1.5$ eta $\mathbb{E}[X]=5$ Mb duen Pareto banaketarentzat, $q_2 = 0.5$, $r_1 = 8.4$ Kb, $r_2 = 16.8$ Kb, $d_{\min} = 2$ s eta $d_{\max} = 9$ s izanik.

- (iii) Kanal egoera baten barruan, eskuratutako zerbitzu maila berdinentzat, Whittle indizeen balioak atzerapenarekiko beherakorrak dira: $v_{(a,d,m)}^* > v_{(a,d+1,m)}^*$. (Begi-ratu 5.9 eta 5.10 Irudiak).



5.10 Irudia: Whittle indizeak kanal egoera probabilitate ezberdinentzat. $\alpha = 1.5$ eta $\mathbb{E}[X]=5$ Mb duen Pareto banaketarentzat, $r_1 = 8.4$ Kb, $r_2 = 16.8$ Kb, $d_{\min} = 2$ s eta $d_{\max} = 9$ s izanik.

- (iv) Kanal egoera hobegoan, eta eskuratutako zerbitzu eta atzerapen maila berdinentzat, Whittle indizearen balioa handiagoa da: $v_{(a,d,m_1)}^* > v_{(a,d,m_2)}^* \forall m_1 > m_2$. (Ikus 5.9 Irudia).
- (v) Kanal kondizio onenean egoteak ez du ziurtatzen Whittle indizearen balioa gaintzeko kanaletan baino handiagoa denik: $v_{(a,d,m < N)}^* > v_{(a',d',N)}^*$ betetzea posible da. 5.9 Irudiko bi grafikoak alderatzen baditugu, erraz ikus daiteke nola zenbait atzerapen edota eskuratutako zerbitzu balioentzat kanal txarrenaren Whittle indizea kanal onenarena baino handiagoa dela (balio ez nuluak ere kontuan hartuta).
- (vi) Kanal kondizio probabilitateekiko menpekotasuna: N kanal kondiziorako Whittle indizearen balioa kanal egoera probabilitatearekin inbariante mantentzen den bitartean, kanal onena ez den kanal kondizio batean kanal hobegoetan egoera probabilitateak handitzen diren heinean Whittle indizearen balioa txikiagotzen da. Bi kanalen kasurako kanal txarrenerako propietate hori 5.10 Irudian zein 5.10 Irudiko grafikoak 5.9 Irudiko ezkerreko grafikoarekin erkatuta islatzen da. Kanal onenerako ez dira kanal egoera probabilitate ezberdinetarako grafiko ezberdinak erakutsi probabilitate horien balioa edozein izanda indizearen balioa berdina bai-

ta.

(vii) $v_{(a,d,n)_i}^*$ kantitateen ez gorakortasun indexabilitate baldintza betetzen da.

Behin Whittle indizearen propietateak aztertuta, zerbitzatzeko multzoaren estruktura zehatza definitzeko ekingo zaio, analitikoki edota konputazionalki tratagarria den Whittle indizearen adierazpena lortzeko asmoz. Modu honetan, (a, d, n) Whittle indizearen adierazpena lortzeko, lehenik eta behin, $(a, d + 1, m)$ eta $(a + r_n, d + 1, m)$ egoeren aktibotasuna zehaztu beharra dago. Whittle indizearen ezaugarrien inguruan ondorioztatutakoagatik, $(a, d + 1, m \leq n) \cup (a + r_n, d + 1, m \leq n)$ egoerak pasiboak direla jakina da. Hala ere, kanal kondizio hobetuegia duten $(a, d + 1, m > n) \cup (a + r_n, d + 1, m > n)$ egoerak zein eskuratutako zerbitzuetik edota atzerapenetik aurrera pasiboak edota aktiboak diren zehaztea ez da tribiala, atalase horiek bai eskuratutako zerbitzuaren bai atzerapenaren menpekoak izanik. Gainera, aurkezten den 5. propietatea kontuan hartuta, bi kanal kondizio soilik izateak ez du zerbitzatzeko multzoaren estruktura errazten.

Dena den, kanal onenean zerbitzatzeko multzoa erabat zehaztuta dago, indizean eragina duten egoera guztiak pasiboak baitira (kanal hobekuntzarik ez egoteagatik, eta etorkizunean bai eskuratutako zerbitzua berdina edo handiagoa eta atzerapena handiagoa direlako). 5.5 Proposizioan adierazten denaren arabera, kanal kondizio onenerako Whittle indizeak forma itxia du (ikus (5.23)), indizearen balioa uneko bukatzeko probabilitatearen eta MOS funtzio normalizatuaren arteko biderkadura izanik. Ohartu kanal egoera onenean lortzen den Whittle indizearen adierazpena kanal konstanterako lortutako GWM indizearen (4.14) baliokidea dela.

5.5 Proposizioa. *Kanal kondizio onenean Pareto banaketa duten fluxuentzako (5.17) problemarako Whittle indizea (5.23) da:*

$$v_{(a,d,N)}^* = \mu_{(a,N)} \cdot \widehat{MOS}(d + 1) \quad (5.23)$$

Frogapena. Ezaguna da $v_{(a,d,N)}^*$ indizearen kalkulurako $\mathcal{F} = \emptyset$ dela. Modu honetan, (5.21) eta (5.22) erabiliz: $\mathbb{R}_{(a,d+1,m)}^{\mathcal{F}} = \beta \sum_{m \in \mathcal{N}} q_m \mathbb{R}_{(a,d+2,m)}^{\mathcal{F}}; \mathbb{R}_{(a,d+2,m)}^{\mathcal{F}} = \beta \sum_{m \in \mathcal{N}} q_m \mathbb{R}_{(a,d+3,m)}^{\mathcal{F}}; \dots; \mathbb{R}_{(a,d > d_{\max},m)}^{\mathcal{F}} = 0$. Hortaz, analogoki, $\mathbb{R}_{(a+r_n,d+1,m)}^{\mathcal{F}} = 0$, $\mathbb{W}_{(a,d+1,m)}^{\mathcal{F}} = 0$ eta $\mathbb{W}_{(a+r_n,d+1,m)}^{\mathcal{F}} = 0$ dira. Terminu nulu horiek (5.20) espresioan ordezkatuz, eta $\beta = 1$ izanik, (5.23) lortzen da. \square

Bestalde, kanal aldakorrerako Pareto bezalako DGHR banaketentzat batz besteko atzerapenaren minimizaziorako problemarako analitikoki edota konputazionalki tratagarria den Whittle indizearen adierazpen orokorra eskuratzea posible ez dela ikusi da 5.1.3.2.2 sekzioan, eta beraz, arestian errandakoaren arabera, gure QoE-aware problemarako hori lortzea are zailagoa dela egiaztatzen da. Hortaz, kanal aldakorrean

Whittle- n oinarritutako QoE-aware indize erregela tratagarria lortzeko hurrengo atalean QoE-aware Whittle indize horren adierazpena sinplifikatzen duen Whittle- n metodoan oinarritutako heuristika hurbildua proposatuko da.

5.2.3.1 Whittle indize hurbilduaren proposamena

Aurreneko paragrafoetan landutakoaren arabera, (5.18) problemarako Whittle indize orokorraren adierazpen tratagarria lortzeko ezintasuna agerian utzi da; kanal kondizio onenerako soilik espresio itxia eskuratu da, gainontzeko kanal kondizioetarako adierazpen analitiko tratagarririk lortzen ez delarik. Modu honetan, azpi-atal honetan Whittle indizearako soluzio hurbildua proposatuko da. Horretarako, 5.1.3.2.3 azpiatalean erabili den antzeko prozedura aplikatuko da.

Lehenik eta behin, zerbitzatzeko multzoaren estruktura zehaztuko dugu. (a, d, n) egoera baten Whittle indizea lortu nahi bada, lehenago ondorioztatutakoagatik, jakina da $(a, d + 1, m \leq n) \cup (a + r_n, d + 1, m \leq n)$ egoerak pasiboak direla, baina ezezaguna den $(a, d + 1, m > n) \cup (a + r_n, d + 1, m > n)$ egoeren aktibotasuna definitu beharra dago. Horrela, egoera horiek pasiboak edo aktiboak diren zehazteko bi kontsiderazio egingo dira. Batetik, onar dezagun edozein $l = 1, 2, \dots, N$ baliorako $\mu_{(a,m)} \approx \mu_{(a+r_l,m)}$ dela. Gisa honetan, $(a, d, m > n)$ egoerak aktiboak direla ezaguna da, eta $\mu_{(a,m)} \approx \mu_{(a+r_n,m)}$ bada, $(a + r_n, d, m > n)$ egoerak aktiboak direla kontsidera dezakegu. Bukatzeko probabilitateen hurbilketa inguruko errorea 5.1.3.2.3 puntuan landu da, eta 5.7 Irudian adierazten denaren arabera errore hori onargarria da oro har sare errealetako parametroak erabiltzen direnean. Bestetik, $\text{MOS}(d) \approx \text{MOS}(d + 1)$ dela onar daiteke, atzerapenaren gehikuntza horiek milisegundoen eskalakoak izanik QoE-aren degradazio hori nabarmentzen ez baita atzerapen maila altuago batean. MOS funtzioaren inguruko hurbilketa hori kontuan hartzen bada, $(a, d, m > n)$ egoerak aktiboak izanik, $(a, d + 1, m > n)$ egoerak ere aktiboak direla suposa dezakegu. Modu berean, aurreko bi hurbilketa horiek konbinatuz, $(a + r_n, d + 1, m > n)$ egoerak aktiboak direla kontsideratzen da.

Behin (a, d, n) egoeraren Whittle indizearen kalkuluan eragina duten lehenengo terminoen aktibotasuna zehaztuta, demagun μ -ren eta MOS funtzioaren hurbilketek $R_{ad} = \sum_m q_m R_{(a,d,m)} \approx \sum_m q_m R_{(a+r_l,d+1,m)}$ eta $W_{ad} = \sum_m q_m W_{(a,d,m)} \approx \sum_m q_m W_{(a+r_l,d+1,m)}$ izatea eragiten dutela. Era honetan, sari eta lan batukari horien hurbilketak erabiliz, Whittle indizearen (5.20) adierazpenaren lehenengo espresio sinplifikatua, $\tilde{v}_{(a,d,n)}^*$ honakoa da:

$$\tilde{v}_{(a,d,n)}^* = \frac{\beta \mu_{(a,n)} (\widehat{\text{MOS}}(d+1) - R_{ad})}{1 - \beta \mu_{(a,n)} W_{ad}} \quad (5.24)$$

Horrela, arestian esandako sinplifikazio horiek aplikatuz, 5.6 Proposizioan azaltzen

den Whittle indizearen hurbilketa lortzen da. Proposatutako Whittle-n oinarritutako indize horri ASPI MOS deituko diogu, ASPIM laburki. Forma itxia duen QoE-aware indize horren espresio analitikoa lortzeko prozedura matematikoa A Eranskinen A.4 atalean biltzen da.

5.6 Proposizioa. *Pareto tamaina banaketa duten fluxuentzat ASPIM indizea (5.25) da:*

$$ASPIM = \tilde{v}_{(a,d,n)}^* = \lim_{\beta \rightarrow 1} \frac{\beta \mu_{(a,n)} \cdot \widehat{MOS}(d+1)(1-\beta)}{1-\beta + \beta \sum_{m>n} q_m(\mu_{(a,m)} - \mu_{(a,n)})} \quad (5.25)$$

(5.25) espresioa aztertzen bada, kanal aldakorrerako lortutako Whittle-n oinarritutako QoE-aware-a den ASPIM indize hori inplementagarria dela ikusten da. Proposatutako scheduling algoritmo berri hori **QoE, tamaina zein kanalaren ezaugarrien menpek**oa da. Bestalde, **kanal kondizio onenerako lortutako indizea (5.23) hurbildu gabeko Whittle indizearen berdina** da, kanal onenerako izendatzaileko batukaria nulua izateagatik. Hala ere, (5.26) espresioan adierazten denaren arabera, kanal egoera onena ez denean indizearen balioa zerorantz doa:

$$ASPIM_{n \neq N} = \lim_{\beta \rightarrow 1} \frac{\mu_{(a,n)} \cdot \widehat{MOS}(d+1)(1-\beta)}{\sum_{m>n} q_m(\mu_{(a,m)} - \mu_{(a,n)})} \rightarrow 0 \quad (5.26)$$

Orduan, **uneko MOS funtzio normalizatua nulua ez duen bere kanal onenean dagoen erabiltzaile batek bere kanal onenean ez dagoen beste erabiltzaile batekiko lehentasuna izango du**. Era honetan, proposatzen den Whittle-n oinarritutako QoE-aware ASPIM indize erregela 5.3 Definizioan laburtzen da.

5.3 Definizioa. **ASPIM indize erregela** honakoan datza: erabakitze une bakoitzean,

- uneko MOS funtzio normalizatu nulua ez duen erabiltzailearen bat bere kanal kondizio onenean egotekotan, bere kanal kondizio onenean dagoen $\mu_{(a,N)} \cdot \widehat{MOS}(d+1)$ baliorik altuena duen erabiltzailea zerbitzatu (N kanalerako ASPIM (5.25) edota (5.23) erabiliz);
- uneko MOS funtzio normalizatu nulua ez duen bere kanal kondizio onenean erabiltzailearik ez egotekotan, $\frac{\mu_{(a,n)} \cdot \widehat{MOS}(d+1)}{\sum_{m>n} q_m(\mu_{(a,m)} - \mu_{(a,n)})}$ baliorik altuena duen erabiltzailea zerbitzatu ($ASPIM_{n \neq N}$ (5.26) $(1-\beta)$ terminoaz normalizatuta erabilita).

Hortaz, **kanal kondizioa onena ez izatekotan, indizearen balioa uneko bukatzeko probabilitatearen eta MOS funtzio normalizatuaren arteko biderkadura eta bukatzeko probabilitatearen hobekuntza itxaropenaren arteko ratioa** da. Modu honetan,

eskuratutako heuristikak kanal aldakorrean batz besteko atzerapenaren problemarako lortutako ASPI indize erregelarekin (5.16) antzekotasunak ditu. Kanal egoera guztiatarako, ASPI eta ASPIM indize erregelen arteko desberdintasuna bigarrenaren indizeen espresioan c kostu konstantea azaldu ordez atzerapenaren menpekoa den uneko MOS normalizatua agertzen dela da.

Beraz, sekzio honetan kanal aldakor testuinguruan batz besteko MOS-a maximizatzeko xedearekin QoE-aware-a den, tamainan oinarritzen den eta channel-aware-a den ASPIM erregela sinplea proposatu da. Hala ere, heuristika horren funtzionamendua egokia dela egiaztatzeko bere errendimendua analizatuko da hurrengo kapituluan.

5.3 Ondorioak

Kapitulu honetan denboran aldakorra den kanalean baliabideen esleipenaren problemarako indize erregelak diseinatzeari ekin zaio. Wireless beherantzko kanaletan arreta berezia jarri bada ere, hemen lortutako emaitzak oro har kanal aldakorreko edozein arlotan baliagarriak dira. Testuinguru horretan, Pareto tamaina banaketa duten fluxuen planifikaziorako helburu desberdina duten bi ikuspegi landu dira: batetik, batz besteko QoE-a maximizatzeko xedea duen ASPIM scheduling estrategia erdietsi da (5.2 atalean), eta bestetik, batz besteko atzerapena minimizatzea asmozat duten Whittle eta SPI politikak eskuratu dira (5.1 sekzioan). Bi kasuetan, lehenik eta behin, dagokien optimizazio problema MDP markoan formulatu da, eta ondoren, lortutako ereduaren soluzio optimoa lortzeko ezintasuna dela eta, Whittle-n metodoa erabilia bi problema horientzat indize erregelak proposatu dira.

Alde batetik, kanal aldakorrean QoE-aware scheduling proposamenari dagokionez, ASPIM erregela hori lortzeko lehenengo urratsa kanal konstanterako planteatutako QoE-aware MDP eredu hori kanal aldakorrera hedatzea izan da, kanal egoera probabilitateak kontuan hartzen dituen eta sari ez nuluak fluxuaren transmisioa bukatutakoan soilik ematen diren hiru dimentsiotako ereduak proposatuz. Ostean, Whittle-n metodoan oinarrituz eta prozedura horretan zenbait sinplifikazio onartuz, tratagarria den QoE-aware den, channel-aware den eta tamainan oinarritzen den SPI indize erregela sinplea eskuratu da.

Kanal aldakorrerako lortutako QoE-aware diziplina horrek kanal onenean dauden eta kalitate subjektiboan saturaturik ez dauden erabiltzaileak lehenesten ditu, kanal horrentzat SPI kanal konstanterako proposatutako GWM politikaren baliokidea delarik. Gainontzeko kanaletan, berriz, indizearen balioa uneko bukatzeko probabilitatearen eta MOS funtzioaren arteko biderkadura eta bukatzeko probabilitatearen hobekuntzaren arteko ratioa da.

Bestaldetik, kanal aldakorrean batz besteko atzerapenaren minimizaziorako proposatutako scheduling estrategia erreferentzia eginez, problema horri dagokion MDP-aren ebazpidea Whittle metodologia izan da. Bi kanal kondizioentzat Whittle indize inplementagarria lortu den arren, N kanalen kasurako indize horren espresio tratagarri erdiestea ez da posible, eta hortaz, zenbait sinplifikazio kontsideratuz SPI Whittle indize hurbildu sinplea proposatu da.

Era honetan, bi kanalen kasurako SPI-ren kanal txarraren adierazpena Whittle-ena baino errazagoa da. Tamainan oinarritutako bi channel-aware diziplina horiek kanal onenari lehenetasuna ematen diote, indizearen espresioa kostean eta uneko bukatzeko probabilitatearen arteko biderkadura izanik, kanal horrentzat kanal probabilitateen

menpekoa ez delarik. Kanal kondizioa onena ez izatekotan, bi politika horientzat kanal probabilitateen menpekotasuna existitzen da, eta ASPI-ren kasuan kanal kondizio horientzat indizearen balioa uneko bukatzeko probabilitatearen eta bukatzeko probabilitatearen hobekuntza itxaropenaren arteko ratioa da.

6. Kapitulu

Balioztatzea

4. Kapitulan, Gittins eta Whittle metodoak erabilia, QoE-n eta tamainan oinarritutako QoE-a maximizatzea helburutzat duen GWM scheduling indize erregela erraza proposatu da (proposamena 4.3 Definizioan) kanal kapazitatea konstantea denerako.

Bestalde, 5. Kapitulan hiru planifikazio estrategia berri simple proposatu dira denboran aldakorra den kanalerako. Batetik, 5.1 puntuan, Whittle-n metodoan oinarriturik, batz besteko atzerapena minimizatzea helburutzat duten Whittle eta ASPI indize erregelak ondorioztatu dira (proposamenak 5.1 eta 5.2 Definizioetan hurrenez hurren). Lehenengoa bi kanalen kasurako soilik baliagarria da, eta bigarrena, berriz, N kanal kopuru orokorrerako; azkenengo horretan Whittle indizearen hurbilketa bat erabiltzen da, horren indizearen adierazpen analitikoa errazagoa delarik. Bestetik, 5.2 puntuan, Whittle metodoari hurbilketak aplikatuta, batz besteko MOS-a maximizatzeko xedea duen QoE-aware ASPIM indize erregela (proposamena 5.3 Definizioan) planteatu da kanal kopuru orokor batentzat.

Era honetan, kapitulu honetan proposatutako indize erregela horien balioztatzea egingo da. Horretarako, proposatutako heuristika horien errendimendua literaturan ezagunak eta garrantzitsuak diren planifikazio diziplinek dutenarekin konparatuko da kanal konstanteko edota kanal aldakorreko simulazio agertoki desberdinetan, scheduling proposamen horien helburua betetzen dela egiaztatuz.

Aitzitik, esan beharra dago, planifikazio indize erregela proposamen horiek lortzeko erabiltzaile baten MDP eredu isolatua kontsideratu dela. Beraz, eskuratutako soluzioak erabiltzaile mota edo klase bakarrean oinarritzen dira. Dena den, emaitza horiek mota

desberdinetako erabiltzaileak daudenen aztertzea interesgarria suerta daiteke.

Modu honetan, proposatutako planifikazio estrategia horien balioztatzerako atal hau lau zatitan banatuko da. Lehenik eta behin, errendimenduaren azterketa horretarako erabiliko den balioztatze metodologia azalduko da 6.1 puntuan, zeinaren definizioa biziki garrantzitsua den proposatutako scheduling algoritmo horien funtzionamendu egokiaren egiaztapena baliagarria izan dadin. Ondoren, aurreko balioztatze metodologia horri jarraituz, kanal konstanterako errendimenduaren analisisa egingo da 6.2 sekzioan, eta segidan kanal aldakorrerako 6.3 puntuan. Bukatzeko, 6.4 atalean, proposatutako scheduling estrategien errendimendua klase anitzeko testuinguruan analizatuko da.

6.1 Balioztatze metodologia

Jarraian proposatutako indize erregelen baliagarritasuna egiaztatzeko balioztatze metodologia deskribatzen da. Horretarako, hasteko, errendimenduaren analisisian aztergai izango diren errendimendu metrikak definituko dira 6.1.1 puntuan. Hurrengo lau azpi-ataletan, 6.1.2, 6.1.3, 6.1.4 eta 6.1.5, simulazioetan erabiliko diren planifikatzailea eta scheduling estrategien, trafikoaren, sarearen eta erabiltzailearen QoE-aren ezaugarriak zehaztuko dira hurrenez hurren. Ondoren, 6.1.6 puntuan, simulazioei buruzko xehetasunak erakutsiko dira. Bukatzeko, 6.1.7 azpi-atalean, balioztatzea egingo den agertokien azalpena emango da.

6.1.1 Azterketarako errendimendu metrikak

GWM indize erregela **bataz besteko MOS**-a maximizatzeko helburuarekin proposatu da, eta beraz, kanal konstanteko azterketarako errendimendu metrika nagusia bataz besteko MOS-a izango da. Honetaz gain, **bataz besteko atzerapena**, $\mathbb{E}[d]$, ere analizatuko da, metrika horrek urteetan zehar errendimendu ikasketetan erakutsi duen garrantzia dela eta. Era berean, ASPIM, ASPI eta Whittle politiken balioztatzerako kanal aldakorreko errendimendu analisisian aurreko bi metrika horiek aztertuko dira.

Bestalde, *fairness* edo ekitatearen kontura metrika baten optimizazioa lortzea alderdi aipagarria da baliabideen kudeaketa estrategiak diseinatzerakoan [Wierman'2011]. Scheduling algoritmo bat justua izan behar da honako zentzuan: metrika baten optimizazioa bermatzeaz gain, banako fluxuak modu justuan tratatzen direla egiaztatzea garrantzitsua da, erabiltzaile batzuek emaitza oso onak lortzea eta gainontzekoak zigortzea ekidituz. Era honetan, bataz besteko MOS-a eta bataz besteko atzerapena aztertzeaz aparte, planifikazio politiken **ekitatea ikertuko da bai QoE-n bai atzerapenean**.

Ekitate neurri bezala metrika baten **Jain indizea** erabiltzea aproposa da [Jain'1984]. Indize horren balioa 0tik 1erako tartean dabil, eta zenbat eta batetik gertuago, orduan eta justuago politika metrika horrekiko. Orduan, QoE-aren zein atzerapenaren ekitatea analizatzeko asmoarekin, **MOS-aren Jain indizea**, **Jain_{MOS}**, eta **atzerapenaren Jain indizea**, **Jain_d**, erabiliko dira ekitate parametro bezala. Bi indize horien definizioa jarraian ematen da (ikus (6.1)).

$$\text{Jain}_{\text{MOS}} = \frac{\left[\sum_{k=1}^K \text{MOS} \right]^2}{K \cdot \sum_{k=1}^K \text{MOS}^2}; \text{Jain}_d = \frac{\left[\sum_{k=1}^K d \right]^2}{K \cdot \sum_{k=1}^K d^2}$$

non K sisteman guztirako erabiltzaile kopurua den. (6.1)

6.1.2 Planifikatzailea eta erabilitako scheduling algoritmoak

Planifikatzaileari dagokionez, erabiltzaile bakarra zerbitzatzeko scheduling erabakiak 1 ms-ro egingo dira, zeinetan desokupazioa onartzen den. Arestian esan bezala, gure scheduling proposamenen errendimendua planifikazio estrategia ospetsuekin alderatuko da. Gainera, literaturan jada existitutako zenbait politika gure azterketa kasura egokituko dira. Diziplina horiek guztiak (*Round Robin* izan ezik), lehentasunean oinarritutako politikak dira, eta beraz, indize erregela bezala jar daitezke. Bestetik, berdinketak egotekotan, berdinketa haustea ausazko eran egingo da. Behean, proposatutako planifikazio estrategietaz aparte, simulazioetan erabiliko diren scheduling algoritmoen deskribapena aurkezten da:

- Gittins: Indize erregela hau eskuratutako zerbitzuaren menpekota da soilik, eta batz besteko atzerapena minimizatzen du kanal kapazitatea konstantea denean. Hazard ratio beherakorra duten banaketentzat Gittins indizearen balioa eta eskuratutako zerbitzuaren menpekota den hazard ratioa baliokideak dira. Beraz, Pareto banaketaren kasurako, transmisio une bakoitzean uneko hazard ratio altuena duen fluxua hautatuko da. Aipatzekoa da ere sistemako erabiltzaile guztiek tamaina banaketa berdina badute Gittins eta *Least Attained Service* (LAS) diziplina [Aalto'2008] baliokideak direla; politika hori uneko eskuratutako zerbitzu baxue-na duen erabiltzaileari transmisioa ematean datza.
- Round Robin (RR) [Pinedo'2012]: Planifikazio estrategia honetan transmisio unek modu zirkularrean esleitzen dira erabiltzaileen artean, hauei transmisio une kopuru bera emateko helburuarekin. Hortaz, RR banaketa uniformedun ausazko politikaren baliokidea da.
- Max Rate (MR) [Aalto'2010]: Opportunistic motako politika honek throughput-a maximizatzen du, eta erabaki une bakoitzean aldiuneko kanal kapazitate altuena duen erabiltzailea zerbitzatzean datza. Erabiltzaile guztiek kanal kapazitate bera badute politika hau erabiltzeak ez du zentzurik, eta bere funtzionamendua berdinketa hausteak zehaztuko du.

- Proportional Fair (PF) [Aalto'2010]: Channel-aware diziplina honek aldiuneko transmisio tasa eta eskuratutako throughput-aren arteko ratio altuena duen erabiltzailea zerbitzatzen du (begiratu 6.2), zeinak throughput-ean fairness-a bermatzen duen.

$$PF = \frac{s}{a/d} \quad (6.2)$$

Ohartu erabiltzaile guztiek kanal kapazitate berdina duten kasurako $PF = d/a$ izatera murrizten dela. Kasu horretan, heuristika horrek ez du interesa handirik aurkezten azkenengo zatidura indize erregela hori aipatuta ez baita, atzerapena zein eskuratutako zerbitzua ahalik eta txikien izatea komeni baitzaigu.

- *cost and Attained Service dependant μ (cAS μ):* $c\mu$ erregela [VanMieghem'1995] eskuratutako zerbitzura egokitzea proposatzen da, kostuaren eta eskuratutako zerbitzuaren menpekoa den $\mu_{(a,n)}$ -ren arteko biderkadura den heuristika aurkeztuz. Ohartaraztekoa da diziplina hau Gittins-en baliokidea dela erabiltzaile guztiek kostu eta kanal kapazitate konstante bera dutenean.
 - *Delay dependant cost and Attained Service dependant μ (DcAS μ):* Estrategia hau proposatutako cAS μ erregelari QoE-awareness-a sartzeko helburuarekin planteatzen da. Horretarako, kasu tradizionalan ez bezala, zeinean kostua konstantea den, atzerapenaren menpekoa den MOS normalizatuaren uneko degradazioa, $c(d)$, kontuan hartuko da oraingoan; hau da, kostua $-(\widehat{MOS}(d+1) - \widehat{MOS}(d))$ izango da. Era honetan, QoE-aware proposamen hori halaxe definituko da: $DcAS\mu = c(d) \cdot \mu_{(a,n)} = (\widehat{MOS}(d) - \widehat{MOS}(d+1)) \cdot \mu_{(a,n)}$.
- Ohartaraztekoa da bai d_{\min} -en azpitik bai d_{\max} -en gainetik ez dela MOS-aren degradaziorik gertatzen; beraz, bi tarte horietan DcAS μ indizea nulua da, eta hortaz, lehentasuna minimoa da horietan.

6.1.3 Trafikoaren ezaugarriak

Sistemako trafiko fluxuei erreferentzia eginez, simulazioetan erabilitako fluxu tamaina banaketa Pareto da (3.1), α eta γ parametroek zehaztuko dutena. Bi parametro horiek batz besteko fluxu tamaina konkretatuko dute. Simulazioetan lau batz besteko tamaina kontsideratu dira, wireless sareetan tipikoak diren batz besteko tamainak [Cecchi'2013] erabiliko direlarik. Jarraian tamaina horiei dagozkien zenbait trafiko fluxu adibide adierazten dira parentesien artean: 0.5 Mb (trafiko txikia: web orria, email), 5 Mb (trafiko ertaina: PDF dokumentua, argazkia, HTTP bideo streaming-eko segmentua), 50 Mb (MP3 audio, GoP) eta 500 Mb (bideo laburra).

Bestetik, erabiltzaileen trafiko fluxuak λ tasadun Poisson prozesu bat jarraituz hel-tzen dira planifikatzailerara.

6.1.4 Sarearen ezaugarriak

Batetik, kanal konstanterako errendimendu analisisian C kanal kapazitate konstanteko sare kasua aztertuko da.

Bestetik, kanal kapazitatea denboran zehar ausazko eran aldatzen den sare kasuko errendimendua analisisian, n kanal kondizioan dagoen erabiltzaile baten kanalaria, kanal horretan egoteko probabilitatea q_n izanik, s_n bps transmisio tasa dagokio TTI batean. Hemen lortuko diren emaitzak kanal aldakorreko edozein testuingurura aplikagarriak badira ere, kanal aldakorreko ezaugarri hori duten sare mugikorretan arreta jarriko da; bereziki, mugimenduan dauden erabiltzaile dinamikoaren kasua kontentplazten da. Gisa honetan, benetako wireless sareetan erabiltzen diren kanal kalitatearen adierazleak diren CQI-en menpekoak diren transmisio tasak erabiliko dira simulazioetan. CQI-en balioen transmisio tasetarako mapeaketa 6.1 Taulan adierazten da, zeina [3GPP'2010; Sesia'2011] lanetako argibideak 20 MHz-ko zelula baterako estrapolatuz lortzen den.

CQI	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
s	0	4.2	6.72	8.4	11.256	16.8	21.84	25.2	26.88	33.6	44.68	50.4	53.76	67.2	75.8	80.64

6.1 Taula: CQIak eta hauei dagozkien kanal abiadurak (Mbps).

Bestalde, planifikazio estrategien portaera sare kondizio ezberdinetan aztertze-ko asmoz sare kondizio ezberdinak kontsideratuko dira. Trafiko fluxuen iritsiera tasak sare karga, ρ , determinatuko du. Ikasketa honetan zazpi sare egoera kontsideratu dira: karga baxua ($\rho = 0.25, 0.375$), karga ertaina ($\rho = 0.5, 0.75$) eta karga altua ($\rho = 0.85, 0.9, 0.95$). Kanal konstantea izatekotan $\rho = \lambda \cdot \frac{\mathbb{E}[X]}{C}$ da, eta kanal aldakorreko testuinguruan, berriz, sare karga kanal onenarekiko definituko da, $\rho = \lambda \cdot \frac{\mathbb{E}[X]}{s_N}$ izanik.

6.1.5 Erabiltzailearen QoE ezaugarriak

QoE-awareness-ari dagokionez, erabiltzaileen hautemandako kalitatea MOS funtzioak berak (3.3) zehaztuko du. Horretarako, d_{\min} eta d_{\max} atalaseen balioak finkatuko dira, zeinek MOS-aren kalkulurako c_1 eta c_2 koefizienteak determinatuko duten. Kalitate subjektiboaren ikuspuntutik simulazio emaitzek zentzua izan dezaten eta baliagarriak izan daitezen, atzerapen-atalase horiek egokiro definituko dira.

Batetik, erabiltzailearen denborarekiko satisfakzioa ezberdina izango da objektua-ren tamaina edota trafiko motaren arabera. Esate baterako, erabiltzaile batek atzerapen

gehiago espero izango du bideo oso bat deskargatzerakoan web bilaketa bat egiterakoan baino. Bestetik, kanal kapazitateak karakterizatutako sare motak eragina izango du MOS funtzioan; hau da, sarea azkarragoa bada atalase hauen balio baxuagoek erabiltzailearen pertzepzioa hobeto islatuko dute. Gainera, fluxuaren berezko zerbitzu denbora tamainaren arabera dela kontuan hartzekoa da; alegia, d_{\min} balioa fluxuaren batz besteko zerbitzu denboraren eskalakoa izan beharko litzateke. Bestalde, erabiltzaileek zerbitzu baten duten iaotasunak edo exijentziak ere MOS funtzioaren definizioan eragina izango du.

Era honetan, aurreko guztia kontuan hartuta eta [Ibarrola'2009] lana abiapuntutzat hartuta, simulazioetan erabilitako atzerapen-atalaseak, eta hauen ondoriozko MOS koefizienteak, egokiro definitu dira.

6.1.6 Simulazioen ezaugarriak

Sare baliabideen planifikaziorako sare ingurunea Matlab-en inplementatu da. Planifikazio diziplina, konfigurazio eta sare karga konbinazio bakoitzeko, 10000 simulazio segundoko iraupena duten 10 simulazio txanda burutuko dira. Txanda horiek ausaz sortutako bai tamaina bai heldueratan desberdintzen dira.

Gisa honetan, metrika bakoitzaren (batz besteko MOS-a, batz besteko atzerapena, ekitate indizeak) guztirako batz besteko balioa 10 txandadun simulazio multzoan lortutako metriken batz bestekoa izango da. Atzerapen eta MOS lagin kopurua mugatuta dagoenez, kontsideratutako metrika bakoitzarentzat %95eko konfidantza tartekak kalkulatu dira T-test-aren bidez. Molde honetan, errendimenduaren azterketa sekzioetako irudietan metrika horiei dagozkien %95eko konfidantza tartekak sartuko dira.

6.1.7 Agertokiaren deskribapena

Aurreko puntuetan ikusitakoaren arabera, proposatutako planifikazio estrategien portaera aztertu eta eratzeko burututako simulazioen parametro nagusiak 6.2 Taulan biltzen dira.

Hala ere, scheduling algoritmoen dagozkien lortutako errendimendu emaitzak oro har baliagarriak direla bermatzeko, barietate ugariko simulazio agertoki desberdinak aztertuko dira. Konfigurazio horien arteko desberdintasuna fluxu tamaina banaketaren parametroen balioetan (eta horien ondorioz, batz besteko tamainan), QoE ezaugarriaren parametroen balioetan, kanal parametroen balioetan edota kostean egongo da. Era honetan, gure planifikazio proposamenek kasuistika desberdinetan emaitza onak ematen dituztela egiaztatuko da.

Ikerketa honetan hogeita bi agertoki adierazgarri landuko dira, Agertoki Identifikatzailea (AId) erabiliz era unibokoan identifikatuko direnak. Ondorengo nomenklatura

Elementua	Parametroa	Balioa
Planifikatzailea	Transmisio periodoa	1 ms
	Politikak	GWM, ASPIM, ASPI, Whittle Gittin, RR, MR, PF, cAS μ , DcAS μ
	Berdinketa haustea	ausazkoa
	Zerbitzua	unitarioa, desokupazioarekin
Trafikoa	Fluxu tamaina banaketa	Pareto (3.1)
		α, γ
	$\mathbb{E}[X]$ (Mb)	0.5, 5, 50, 500
	Fluxu etorrera banaketa	Poisson
		λ
Sarea	Kanal kapazitatea	konstantea: C bps aldakorra: s(CQI) bps
	Kanal probabilitatea	q
	Karga, ρ	0.25, 0.375, 0.5, 0.75, 0.85, 0.9, 0.95
Erabiltzailearen QoE	MOS funtzioa	(3.3)
		$d_{\min}, d_{\max}, c_1, c_2$
Simulazioa	Iraupena	10000 s
	Errepikapen kopurua	10
	Simulatzailea	Matlab

6.2 Taula: Simulazio parametroak.

erabiliko da agertokiak identifikatzeko: $K_1 K_2 E e$

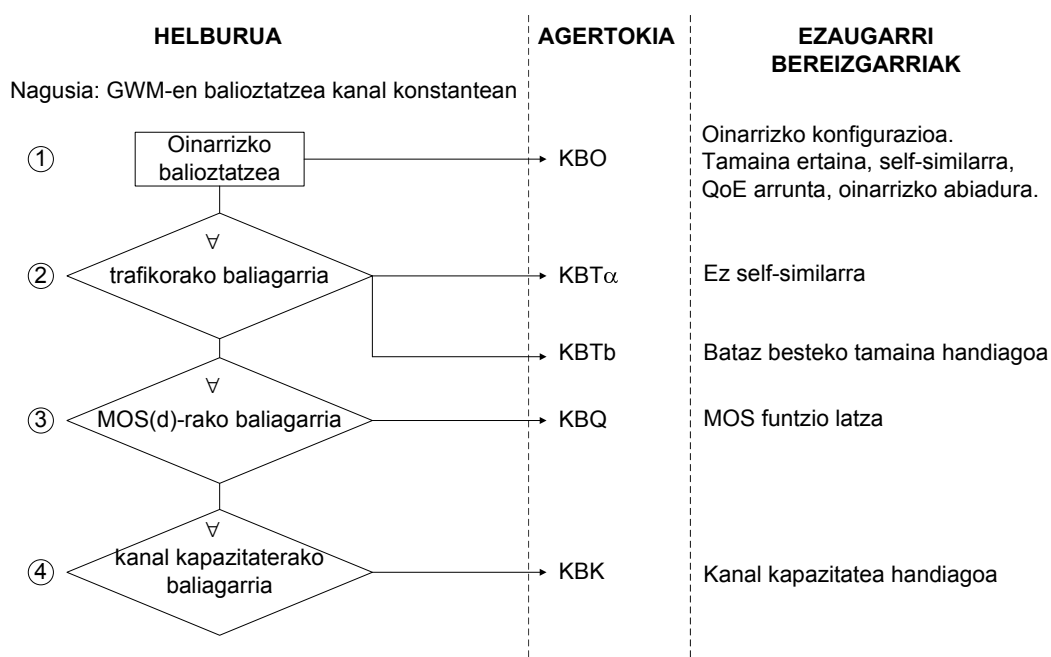
- K_1 : Kanal mota, kapazitatea konstantea bada K hizkia erabiltzen da. Kanala aldakorra izatekotan A hizkia erabiltzen da, azpi-indize bezala kanal kondizio kopurua adieraziz.
- K_2 : Klase kopurua, klase bakarraren kasuan B , eta klase anitzerako, berriz, A .
- E : Agertokiaren ezaugarri bereizgarria, hauen artean tamaina (T), QoE (Q) eta kanal ezaugarria (K) daude, edota agertokia bera identifikatzen duen ezaugarriren bat (esate baterako, O hizkiak oinarrizko agertokia adierazten du). Klase anitz motako agertokientzat, hizki hori klaseen arteko desberdintze ezaugarria da.
- e : E ezaugarri bereizgarriaren barruan parametroren bat zehaztu nahi baldin bada. Adibidez, tamaina ezaugarriko α parametroa edo b hizkia batz bestekoa adierazten duena.

Lehenago esan den bezala, gure scheduling proposamenen balioztatzerako errendimendu analisia hiru ataletan landuko da. Lehendabizi, GWM-en balioztatzea egiteko errendimenduaren azterketa kanal konstanteko agertokietan egingo da, eta agertoki horiei buruzko argibideak 6.1.7.1 atalean azaltzen dira. Ondoren, kanal aldakorreko ager-

tokien bidez proposatutako planifikazio diziplinak balioztatuko dira, aztergai izango diren konfigurazioei buruzko xehetasunak 6.1.7.2 sekzioan ematen direlarik. Eta amaitzeko, erabiltzaile mota desberdinak daudenean gure proposamenak baliagarriak direla baieztatzeko asmoz, 6.1.7.3 puntuko klase anitzeko agertokiak ere kontenplatuko dira.

6.1.7.1 Kanal konstanteko kasurako errendimenduaren analisirako agertokiaren aukeraketa eta deskribapena

Lehenik eta behin, GWM-en balioztatzerako, kanal konstanteko klase bakarreko bost agertoki esanguratsu ikasiko dira. Konfigurazio horietako bakoitzaren barruan erabiltzaile guztiek tamaina, QoE eta kanal ezaugarri berdinak dituzte. Agertoki horiek aukeratzeko prozedura, hala nola horien ezaugarri nagusiak 6.1 Irudian laburbiltzen dira. Horrez gain, puntu honen amaieran konfigurazio horien parametro guztien balioak 6.3 Taulan azaltzen dira.



6.1 Irudia: Kanal konstanteko errendimenduaren analisirako agertokiaren aukeraketa estrategiaren laburpena.

Agertoki horien definiziorako *KBO* agertokia oinarriztat hartu da, eta horren ezaugarriren bat aldatuta gainontzeko konfigurazioak definitu dira. *KBO* konfigurazio horrek tamaina ertaineko fluxu self-similarrak kontsideratzen ditu, zeinaren QoE koefizienteak arruntak diren bataz besteko fluxu tamaina horretarako eta oinarriztat hartutako 10 Mbps-ko abiadura horretarako. Ikasketa honetan self-similar motako Pareto

banaketan arreta jartzen da, zeinak hobeto modelatzen duen Internet-eko trafikoa. Hala eta guztiz ere, kasu ez self-similarerako ere gure proposamena baliagarria dela egiaztatuko da.

Era honetan, KBT_α agertokia kasu ez self-similarrean datza, zeinak oinarrizko konfigurazioaren batz besteko tamaina duen, horretarako KBO agertokiarekiko Paretoaren parametroak aldatu direlarik. Horrez gain, oinarrizko konfigurazioko self-similaritate ezaugarria mantenduz, oinarrizko agertokiarekiko batz besteko tamainan desberdintzen den KBT_b agertokia kontenplatu da, batz besteko tamaina hamar aldiz handiagoa izanik; batz besteko tamaina handiagoa izatearen ondorioz, QoE-a karakterizatzeko atzerapenaren atalaseen balioak konfigurazio horrentzat altuagoak dira aurreko bi konfigurazioekiko.

Bestalde, KBQ agertokiak atzerapenarekiko tolerantzia gutxi duen erabilztailearen egoera islatuko luke. MOS funtzioa latza izan dadin, agertoki horretan d_{\min} -en eta d_{\max} -en balioak gertuago daude; hau da, aurreko kasuetan d_{\max} -en balioa d_{\min} -ena baino 20 (KBO eta KBT_α agertokietan) eta 6 (KBT_b agertokian) aldiz handiagoa bada, oraingoan goi atalasearen balioa behe atalasearena baino 1.5 aldiz handiagoa da soilik. Honela, agertoki horretan QoE-aren degradazio tartean MOS funtzioaren jaitsiera oso aldapatsua da.

Orain arteko agertoki guztietan kanal kapazitate bera kontsideratu da. Era honetan, scheduling politika desberdinentzat kanal kapazitatea ezberdina denean aurreko agertokietako errendimendu metriken ezaugarriak mantentzen direla egiaztatzeke hamar aldiz handiagoa den kanal kapazitatea duen KBK agertokia kontenplatu da. Bestalde, sarea azkarragoa izateak, batetik, zerbitzu denbora murrizten du, eta bestetik, erabilztaileak atzerapena txikiagoa izatea espero izango du. Beraz, egoera horretan QoE-ak zentzua izan dezan, atzerapen atalaseen balioa hamar aldiz txikiagotu da oinarrizko agertokiarekiko.

AId	MOS	Tamaina	Kanala
KBO	$d_{\min} = 0.5 \text{ s}, d_{\max} = 10 \text{ s}$ $c_1 = 4.07, c_2 = 1.33$	$\alpha = 1.5, \gamma = 4 \cdot 10^{-7}$ $\mathbb{E}[X] = 5 \text{ Mbit}$	$C = 10 \text{ Mbps}$
KBT_α	$d_{\min} = 0.5 \text{ s}, d_{\max} = 10 \text{ s}$ $c_1 = 4.07, c_2 = 1.33$	$\alpha = 4, \gamma = 6.66 \cdot 10^{-8}$ $\mathbb{E}[X] = 5 \text{ Mbit}$	$C = 10 \text{ Mbps}$
KBT_b	$d_{\min} = 5 \text{ s}, d_{\max} = 30 \text{ s}$ $c_1 = 8.59, c_2 = 2.23$	$\alpha = 1.5, \gamma = 4 \cdot 10^{-8}$ $\mathbb{E}[X] = 50 \text{ Mbit}$	$C = 10 \text{ Mbps}$
KBQ	$d_{\min} = 0.4 \text{ s}, d_{\max} = 0.6 \text{ s}$ $c_1 = -4.03, c_2 = 9.86$	$\alpha = 1.5, \gamma = 4 \cdot 10^{-7}$ $\mathbb{E}[X] = 5 \text{ Mbit}$	$C = 10 \text{ Mbps}$
KBK	$d_{\min} = 0.05 \text{ s}, d_{\max} = 1 \text{ s}$ $c_1 = 1, c_2 = 1.33$	$\alpha = 1.5, \gamma = 4 \cdot 10^{-7}$ $\mathbb{E}[X] = 5 \text{ Mbit}$	$C = 100 \text{ Mbps}$

6.3 Taula: Parametro multzoa kanal konstanteko klase bakarraren kasuko agertokietan.

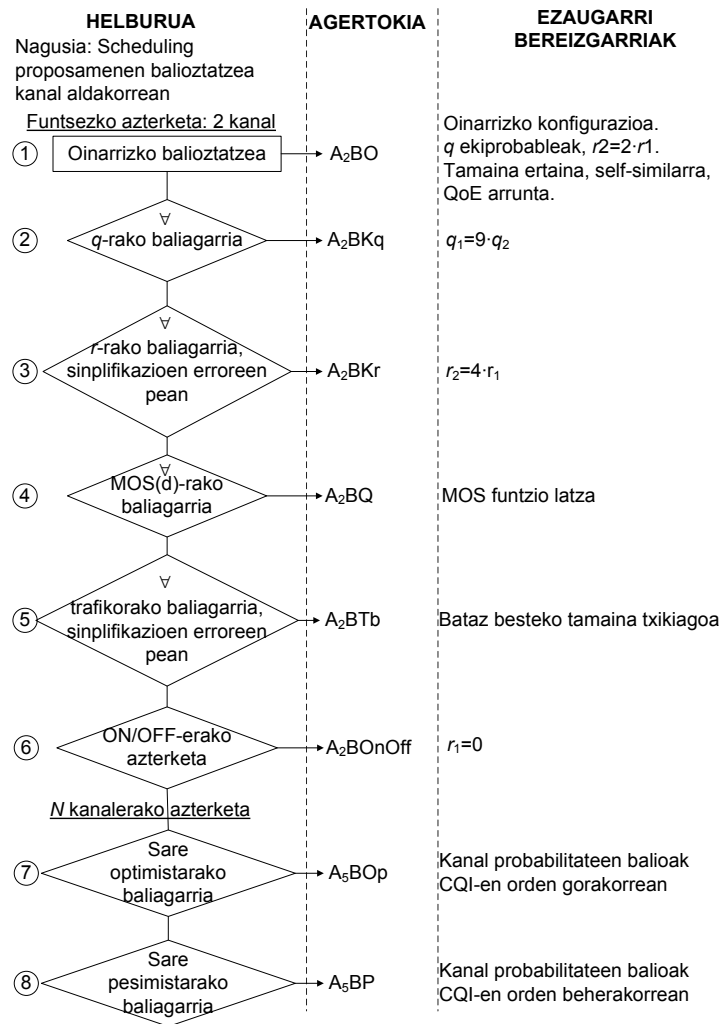
Ohartu, momentura arte aurkeztutako agertokietan erabiltzaile guztiek kanal kapazitate bera dutela suposatzen dela, eta hortaz, horietan ez da $cAS\mu$, MR eta PF politiken ezta proposatutako hiru channel-aware diziplinen ikasketa egingo. Horrez gain, kanal konstanteko agertokietan errendimendu desegokia erakusten duen politikarik egotekotan ez da kanal aldakorreko azterketan analizatuko.

6.1.7.2 Kanal aldakorreko kasurako errendimenduaren analisirako agertokiaren aukeraketa eta deskribapena

Denboran aldakorra den kanalaren kasurako planifikazio estrategia desberdinen inguruko errendimendu emaitzak orokorrean baliagarriak izan daitezzen, horien portaera esanguratsuak diren barietate ugariako kanal aldakorreko zenbait simulazio agertokietan landuko da, gure indize erregela proposamenek kasuistika desberdinetan emaitza egokiak ematen dituztela egiaztatuz. Horretarako, azterlan honetan, kanalean, QoE-an, edota tamainan desberdintzen diren kanal aldakorreko zortzi agertoki aztertuko dira. Agertoki horiek hautatzeko estrategia, horien karakteristika aipagarrienekin batera, 6.2 Irudian adierazten dira. Gainera, atal honen bukaeran agertoki horiei buruzko parametro guztiak jasotzen dira 6.6 Taulan.

Kanal aldakorreko ingurunean scheduling algoritmoek duten errendimenduari buruzko funtsezko ezagutzak eskuratzeko asmoz, lehendabizi bi kanal egoera soilik kontsideratzen dituzten agertokiak ikasiko dira. Bi kanaleko oinarritzko A_2BO agertokiak kanal egoeren kasu ekuiprobablea kontenplatu du, zeinetan aurkeztutako CQI-en baliore horiek bataz besteko transmisio abiadura 12.6 Mbps izatea eragiten duten. Fluxuen tamainari dagokionez, bataz besteko ertaina duen kasu self-similarra kontsideratzen da. A_2BO konfigurazioa oinarritzat hartuta gainontzeko agertokiak horren ezaugarrien bat aldatuz definitu dira.

Modu honetan, oinarritzko konfigurazioarekiko kanal ezaugarrian desberdintzen diren A_2BKq eta A_2BKr agertokiak kontsideratzen dira. Lehenengoa, kanal probabilitateak ekuiprobableak ez direnen kasua da, zeinetan kanal onaren probabilitatea kanal txarrenarena baino baxuagoa den, onarena bederatzi aldiz txikiagoa izanik (bataz besteko abiadura 9.24 Mbps). A_2BO zein A_2BKq konfigurazioetan kanal onaren transmisio tasa txarrenarenaren bikoitza da, eta A_2BKr agertokian, berriz, kanal onaren abiadura lau aldiz txarrenarena dela kontsideratuko da (bataz besteko abiadura 21 Mbps), gainontzeko ezaugarriak kanal aldakorreko oinarritzko agertokiaren berdinak izanik. Ohartu kanal onaren abiadura handitzeak ASPI zein ASPIM politiken kanal txarreko indizearen kalkuluan onartutako μ hurbilketa eta batukarien sinplifikazioaren errorea handitzen duela, eta errore handiago horren menpe diziplina horien errendimendua aztertzea interesgarria suertatzen da.



6.2 Irudia: Kanal aldakorreko errendimenduaren analisirako agertokien aukeraketa estrategiaren laburpena.

Horrez gain, kanal aldakorreko ingurunean QoE ezaugarriari dagokionez atzerape-narekiko oso tolerantzia baxua deneko kasua aztertuko da A_2BQ agertokian.

Puntu honetara arteko agertokietan 5 Mb-eko bataz besteko fluxu tamainak kontsi-deratu dira. Hala ere, ezaguna da bataz besteko tamaina txikiagoa bada, ASPIM zein ASPI erregeletan erabilitako indizeak lortzeko eramaten den μ hurbilketaren errorea al-tuagoa dela. Era honetan, A_2BTb agertokian bataz besteko fluxu tamaina hamar aldiz txikiagoa da, eta konfigurazio hori, beste gauzen artean, Whittle-n oinarritutako bi po-litika horiek, errore horren pean, errendimendu ona ematen dutela egiaztatzeko egokia da. Bestalde, tamaina berri horri dagokion QoE ezaugarria koherentea izan dadin, MOS funtzioaren parametroak bataz besteko tamaina horretara egokitu dira.

Bestalde, kanal kondizioak bi egoera izateak ON/OFF kanalen kasu garrantzitsua kontuan hartzen du. Kanal eredu hori wireless sistemetan aplikagarria izateaz gain, denbora aldakorreko etenaldiak dituzten sistemen arloan oso erabilgarria da. Era honetan, ON/OFF kanalen kasu berezia ikasiko da $A_2BOnOff$ agertokiaren bidez.

Jarraian kanal egoera kopurua bi baino handiagoa denerako kontenplatuko diren agertokiak deskribatzen dira. Ohartu konfigurazio horietan bi kanalerako lortutako Whittle indize erregela ez dela baliagarria.

N kanaleko lehenengo konfigurazioan, A_5BOP , bost kanal egoera kontsideratzen dira, zeinetan kanal probabilitateen balioek CQI-en orden gorakorra (ikus 6.4 Taula) jarraitzen duten. Kanal egoera bakoitzaren transmisio abiadurari dagokionez, kontuan hartutako CQI-en abiadurak txarrenarenaren multiploak dira, aldameneko bi kanal egoeren arteko abiadura aldea bikoitza izanik. Konfigurazio horri dagokion batz besteko abiaduraren balioa 39.69 Mbps da. Beraz, zenbat eta kanal egoera handiagoa izan hainbat eta kanal egoera horren egoera probabilitatea altuagoa izatearen, zein batz besteko abiadura erresultantea nahiko altuaren ondorioz, sare egoera baikor baten aurrean gaudela esan daiteke. Hori guztiarekin, QoE ezaugarria exijenteagoa izatea kontenplatzen da.

Aurkeztutako aurreko konfigurazioarekin alderatuta, hurrengo A_5BP agertokian kanal probabilitateen balioak CQI-ekiko beherakorrak dira (begiratu 6.5 Taula). Bestetik, aurreko agertokiarekin erkatuta, horrek batz besteko abiaduraren balioa baxuagoa izatea eragingo du, oraingoan 13.86 Mbps-koa izanik. Hortaz, sare egoera ezkorra dela esan daiteke.

CQI	1	3	5	9	13
q	0.05	0.1	0.2	0.25	0.4

6.4 Taula: CQI-ak eta horien goranzko ordeneko kanal-egoera probabilitateak.

CQI	1	3	5	9	13
q	0.4	0.25	0.2	0.1	0.05

6.5 Taula: CQI-ak eta horien beheranzko ordeneko kanal-egoera probabilitateak.

6.1.7.3 Klase anitzeko errendimenduaren analisirako agertokien aukeraketa eta deskribapena

Ondoren, erabiltzaile bakarrerako MDP eredu batetik eratortzen diren proposatutako indize erregela horiek klase anitzeko inguruneetan ere baliagarriak direla egiaztzeko asmoz, klase anitzeko beste bederatzi kasu interesgarri analizatuko dira. Bi erabiltzaile klase desberdinetakoak izango dira hauen tamaina, QoE edo kanal ezaugarriren bat edo gehiago desberdina izatekotan. 6.3 Irudian agertoki/klase horien aukeraketa estrategia zein xehetasunak ematen dira. Horretaz aparte, sekzio honen amaieran konfigurazio horien parametroak biltzen dira 6.9 Taulan. Ohartu klaseen artean desberdinak diren

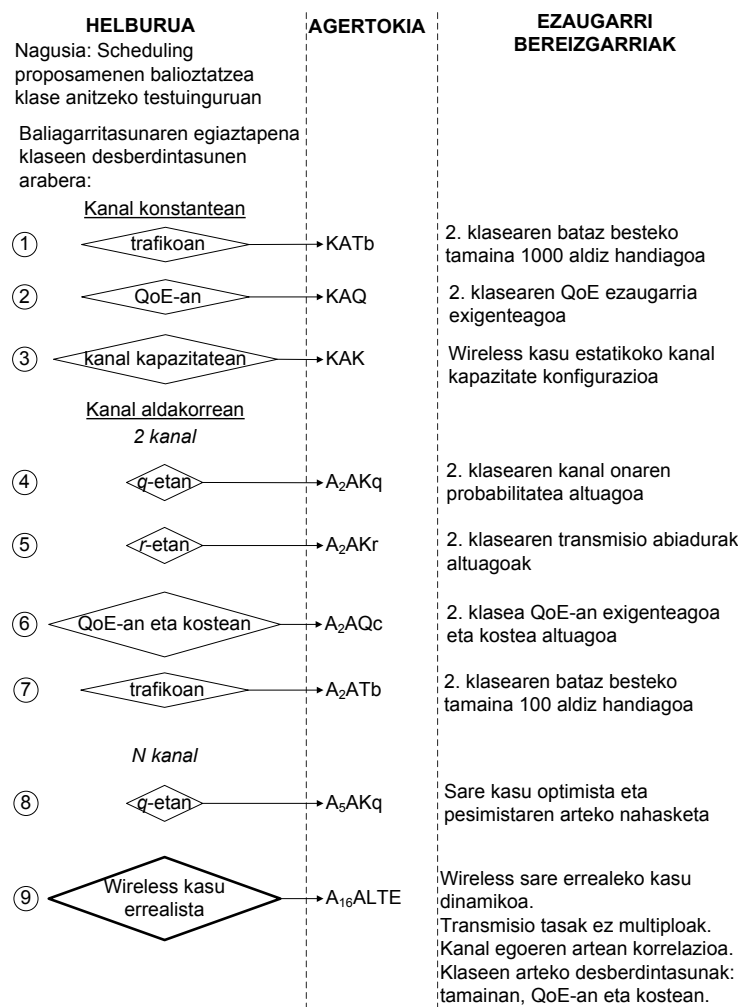
AId	MOS	Tamaina	Kanala	c
A_2BO	$d_{\min} = 0.5 \text{ s}, d_{\max} = 10 \text{ s}$ $c_1 = 4.07, c_2 = 1.33$	$\alpha = 1.5, \gamma = 4 \cdot 10^{-7}$ $\mathbb{E}[X] = 5 \text{ Mbit}$	$CQI=\{3,5\}$ $q_2 = 0.5$	1
A_2BKq	$d_{\min} = 0.5 \text{ s}, d_{\max} = 10 \text{ s}$ $c_1 = 4.07, c_2 = 1.33$	$\alpha = 1.5, \gamma = 4 \cdot 10^{-7}$ $\mathbb{E}[X] = 5 \text{ Mbit}$	$CQI=\{3,5\}$ $q_2 = 0.1$	1
A_2BKr	$d_{\min} = 0.5 \text{ s}, d_{\max} = 10 \text{ s}$ $c_1 = 4.07, c_2 = 1.33$	$\alpha = 1.5, \gamma = 4 \cdot 10^{-7}$ $\mathbb{E}[X] = 5 \text{ Mbit}$	$CQI=\{3,9\}$ $q_2 = 0.5$	1
A_2BQ	$d_{\min} = 0.4 \text{ s}, d_{\max} = 0.6 \text{ s}$ $c_1 = -4.03, c_2 = 9.86$	$\alpha = 1.5, \gamma = 4 \cdot 10^{-7}$ $\mathbb{E}[X] = 5 \text{ Mbit}$	$CQI=\{3,5\}$ $q_2 = 0.5$	1
A_2BTb	$d_{\min} = 0.05 \text{ s}, d_{\max} = 1 \text{ s}$ $c_1 = 1, c_2 = 1.33$	$\alpha = 1.5, \gamma = 4 \cdot 10^{-6}$ $\mathbb{E}[X] = 0.5 \text{ Mbit}$	$CQI=\{3,5\}$ $q_2 = 0.5$	1
$A_2BOnOff$	$d_{\min} = 0.5 \text{ s}, d_{\max} = 10 \text{ s}$ $c_1 = 4.07, c_2 = 1.33$	$\alpha = 1.5, \gamma = 4 \cdot 10^{-7}$ $\mathbb{E}[X] = 5 \text{ Mbit}$	$CQI=\{0,5\}$ $q_2 = 0.5$	1
A_5BOP	$d_{\min} = 0.5 \text{ s}, d_{\max} = 10 \text{ s}$ $c_1 = 3.79, c_2 = 1.73$	$\alpha = 1.5, \gamma = 4 \cdot 10^{-7}$ $\mathbb{E}[X] = 5 \text{ Mbit}$	ikus 6.4 Taula	1
A_5BP	$d_{\min} = 0.5 \text{ s}, d_{\max} = 10 \text{ s}$ $c_1 = 4.07, c_2 = 1.33$	$\alpha = 1.5, \gamma = 4 \cdot 10^{-7}$ $\mathbb{E}[X] = 5 \text{ Mbit}$	ikus 6.5 Taula	1

6.6 Taula: Parametro multzoa kanal aldakorrekotako klase bakarraren kasuko agertokietan.

parametroak azpi-indizeen bidez adierazten direla; esate baterako, 1 azpi-indizea lehenengo klaseari dagokio, eta 2 azpi-indizea, berriz, bigarrenari. Klaseek balio berdina duten parametroetan, hau da, parametro komunetan, ez da azpi-indizerik erabiltzen.

Testuinguru horretan, sistemara heltzen den k klaseko erabiltzaile bat λ_k poisson-dar tasarekin iritsiko da. Beraz, klase horri dagokion sare karga, ρ_k , eta guztirako sare karga, ρ , halaxe definituko dira: batetik, kanal konstantean $\rho_k = \lambda_k \cdot \mathbb{E}[X_k] \cdot \mathbb{E}[\frac{1}{C_k}]$ da, eta bestetik, kanal aldakorrerako, osteraz, $\rho_k = \lambda_k \cdot \frac{\mathbb{E}[X_k]}{s_{k,N_k}}$, $\rho = \sum_k \rho_k$ izanik. Honekin batera, simulazioetan izango ditugun bi klaseko agertokietan $\rho_1 = \rho_2$ dela onartuko da erraztasunerako; salbuespena KAK agertokia da, zeinetan λ_k iritsiera tasek klase guztien artean balio bera dutela kontsideratzen den.

Kanal konstanteko klase anitzeko azterketari dagokionez, oraingoan ere analizatuko diren klaseen oinarria KBO konfigurazioa da. [Osipova'2009; Avrachenkov'2010] ikerketek Gittins-en batz besteko optimalitateko emaitzak tamaina banaketak bereizitako klase anitzen kasura aplikatzen dituzte, eta Pareto fluxu tamaintzat Gittins-ek LAS eta RR gainditzen dituela ondorioztatzen da. Ildo honetatik jarraituz, batz besteko tamaina oso desberdina duten bi klaseek osatutako $KATb$ konfigurazioa aztertuko da. Agertoki horretan, bigarren klasearen batz besteko tamaina lehenengoarena baino 1000 aldiz handiagoa da, Paretoaren eskala parametroan desberdintzen direlarik. Gainera, QoE-ari dagozkion atzerapen atalaseak batz besteko tamaina horietara egokitu dira.



6.3 Irudia: Klase anitzeko errendimenduaren analisirako agertokien aukeraketa estrategiaren laburpena.

Bestaldetik, sare-zerbitzu paradigman erabiltzailearen zerbitzuaren kalitate subjektiboari dagokionez erabiltzaileen artean eskakizun ezberdinak daude. Era honetan, KAQ agertokian aspektu hori kontuan hartzen da, eta konfigurazio horretan QoE ezaugarrian bereizten diren bi erabiltzaile klase kontsideratu dira. Horretarako, bigarren klasearen atzerapenaren goi-atalasearen balioa lehenengoarenaren balioaren erdira jaitsi da, atzerapenaren behe-atalasea batz besteko zerbitzu denboraren arabera finkatu delarik bi klaseentzako.

Ohartu, orain arte aurkeztutako kanal konstanterako agertokietan erabiltzaile guztiek kanal kapazitate bera dutela suposatzen dela. Hala ere, gure planifikazio proposamenaren balioztatzea erabiltzaileek kanal kapazitate ezberdinak dituztenean aztertzea

interesgarria da, eta hori dela eta, ezaugarri hori betetzen duen *KAK* agertokiaren analisia egitea planteatu da. Erabiltzaileen artean kanal kapazitate aniztasunaren existentzia orokorra bada ere, gure ikasketa ezaugarri hori duen erabiltzaileak gelditu dauden wireless sare batean zentratuko da. Dena den, konfigurazio horrekin lortutako emaitzak, oro har, kanal anitzeko edozein agertokirako baliagarriak izango direla esan genezake.

Modu honetan, wireless zelula bakarrean oinarri-estazioetik terminal mugikorrera behearazko trafikoaren transmisiorako scheduling problema kontsideratzen da. Gure ikasketa zelulan mugitzen ez diren erabiltzaileak soilik dauden kasura murrizten da. Ingurune horretan, erabiltzailearen kanal kapazitatearen balioaren eragile nagusia erabiltzaileak zelulan duen kokapena da. Molde honetan, kanal kapazitate balio hori oinarri-estazioaren eta terminal mugikorraren distantziak zehaztuko du nagusiki. [Aalto'2007] lanean ezaugarri horiek dituen sistema bat batz besteko atzerapen terminoetan analizatzen da, baina QoE-aren portaeraren inguruan ez da ezer ikasten.

Gure simulazioetan sistema mailako irrati sarbide simulagailu batetik [Ikuno'2010] lortutako CQI trazarak erabili dira. Bestalde, zelularen barruan erabiltzaile mugikorren kokapenak banaketa uniformea jarraitzen duela onartzen da, eta horri dagokion kanal egoeren probabilitateak, q , 6.7 Taulan aurkezten dira. Kanal kapazitateen aniztasun horrek 15.8 Mbps-ko batz besteko kanal abiadura ematen du. Ohartu kanal egoera txarrenaren probabilitatea nulua dela, CQI horri dagokion kanal abiadura nulua baita, eta horrek kanal egoera horretan dauden erabiltzaileek kanalera bitik ezin transmititzea eragiten du; hau da, azken finean kanal egoera horretan erabiltzailerik ez balego bezala izango litzateke, transmisio abiadura nulua duten erabiltzaileak sistematik baztertzeko direlarik.

CQI	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
q	0	10^{-6}	0.33	0.12	0.14	0.09	0.08	0.07	0.07	0.05	0.03	0.01	0.003	0.002	0.001	0.0006

6.7 Taula: Kanal-egoera probabilitateak kasu estatikoan.

Bestaldetik, agertoki horretan aztertzen diren planifikazio diziplinei dagokienez, kanal konstanteko gainontzeko agertokiekin alderatuta, aurrekoetan kontsideratutako politikak (GWM, Gittins, RR eta $DcAS_{\mu}$) gehi hiru channel-aware estrategia kontsideratuko dira, cAS_{μ} (kostu unitarioarekin), MR eta PF hain zuzen ere.

Jarraian, kanal aldakorrean bai bi kanaleko bai N kanaleko klase anitzeko agertokiak aztertuko dira. Lehenik eta behin, klaseak kanal ezaugarrian desberdintzen diren bi kasu aurkezten dira. Batetik, kanal probabilitateari dagokionez desberdinak diren bi klaseez osatutako A_2AKq agertokia daukagu, zeinetan bigarren klasearen kanal onaren probabilitatea altuagoa den. Bestetik, A_2AKr agertokiak transmisio abiaduran desberdintzen diren bi klase kontsideratzen ditu. Konfigurazio horretako bigarren klasean

CQI-en balioak altuagoak dira, bataz besteko abiadura totala altuagoa izanik; bataz besteko abiadura hazkunde horrekin QoE ezaugarriarekin koherentzia mantentzeko konfigurazio horretara egokitzen diren QoE-an exijenteagoak izatearen MOS parametroak erabili dira. Agertoki horren beste ezaugarri bereizgarria tamaina banaketa ez self-similarra izatea da.

Horretaz aparte, QoE ezaugarrian eta kostuan bereizten diren bi klaseen kasua analizatuko da, A_2AQc agertokia hain zuzen ere. Konfigurazio horretan bigarren klasea, batetik, QoE-an exijenteagoa da, eta bestetik, klase horretako erabiltzaile fluxuak garrantzitsuagoak direla esan daiteke, horren kostua lehenengoarena baino bost aldiz handiagoa izanik.

Bi kanaleko agertokien definizioarekin amaitzeko, bataz besteko tamainan ezberdina diren bi klaseen arteko nahasketa adierazten duen A_2ATb agertokia deskribatzen da. Konfigurazio horretan ikasketa honetan kontsideratutako bataz besteko tamaina txikiena eta bigarren handiena erabiltzen dira, eskala parametroan desberdintzen direlarik, lehenengo klasearen bataz besteko tamaina bigarrenarena baino ehun aldiz txikiagoa izanik. Gainera, QoE koefizienteak tamainara egokituta daude bi klaseetan.

N kanaleko klase anitzeko agertokiei erreferentzia eginez, klase bakarreko sare ezkor eta baikor (A_5BP eta A_5BOP hurrenez hurren) konfigurazioen nahasketatik A_5AKq agertokia sortzen da. Beraz, agertoki berri horretan kanal kapazitate probabilitateetan (eta QoE ezaugarrian) desberdintzen diren bi klase kontenplazten dira.

Azkenengo konfigurazioak, $A_{16}ALTE$, benetako LTE wireless sare bateko agertokia islatzen du. Horretarako, sistema mailako irrati sarbide simulagailu batetik [Ikuno'2010] eskuratutako CQI trazak erabili dira, zeinaren irrati zelulan 5 km/h abiaduran mugitzen diren erabiltzaileak kontsideratzen diren. Beraz, kanalaren denboran aldakorreko izaera bai fading bezalako degradazioen bai erabiltzailearen mugikortasunaren ondoriozkoa da. Erabiltzaile dinamiko kasu horretan, kanalaren propagazioa *Extended Pedestrian A* ereduaren bidez definitzen da.

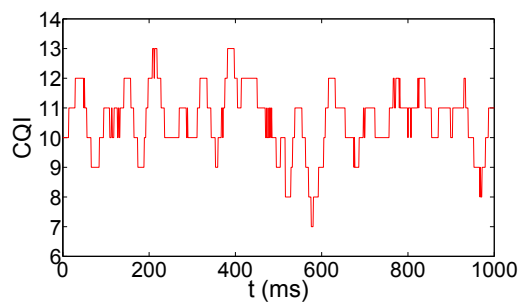
Sare bateko kasu erreala adierazten duen agertoki horretan, gaur egungo LTE bezalako wireless teknologietan gertatzen den bezala, hamasei kanal egoera kontsideratzen dira. Kanal egoera horiei dagozkien egoera probabilitateak 6.8 Taulan azaltzen dira, zeinetan probabilitate horiek kanal kalitatearen handipenarekin txikiagotzen diren (aurreneko kasu ezkorren antzera). Bestalde, aztergai den agertoki honetan, tamainan, QoE ezaugarrian eta kostean desberdintzen diren bi klase kontsideratzen dira, konfigurazio horren bataz besteko abiadura erresultantea 12.162 Mbps-koa izanik. Bigarren klasearen bataz besteko tamaina hamar aldiz lehenengoarena da, trafiko laburreko klaseari lehentasuna ematen zaiolarik horren kostua bost aldiz bestearena izanik eta QoE-an exijenteagoa izanik ere.

CQI	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
q	0.28	0.12	0.09	0.08	0.08	0.08	0.07	0.06	0.05	0.04	0.03	0.01	0.009	0.0005	0.0003	0.0002

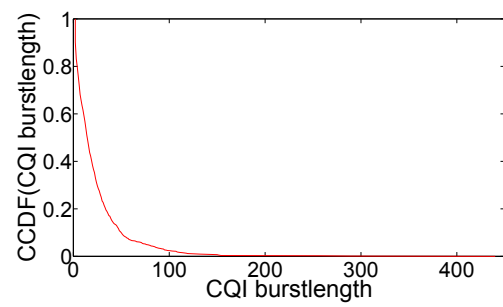
6.8 Taula: Kanal-egoera probabilitateak kasu dinamikoan.

Hala ere, ondorengoan azalduko denaren arabera, agertoki honen simulazioetan erabilitako kanal ereduak, 5.1 eta 5.2 sekzioetan proposatuko MDP ereduak erabilitakoarekin ez dator guztiz bat, eta hortaz, eredu horietatik ondorioztatutako indize erregela proposamenak ez daude testuinguru horretarako era zehatzean definituta. Batetik, konfigurazio honetan kontsideratutako transmisio tasak ez dira denak multiploak haien artean, eta beraz, eskuratutako zerbitzuak ezin dira soilik, proposatutako ereduak bezala, nulua ez den lehenengo kanal kondizioaren multiploak izan. Era honetan, atal honetako simulazioetan eskuratutako zerbitzuen balioen murrizketa hori ez da kon-tuan hartzen, eta proposatutako planifikazio erregelen indizeen kalkuluan beharrezkoa den edozein eskuratutako zerbitzu erabiliko da. Bestetik, sare ingurune horretan kanal egoeren arteko korrelazioa existitzen da, eta gure kanal eredu teorikoan kanalaren bila-kaera denboran eboluzio historikoaren independentea da. Beraz, gure kanal ereduaren n kanal egoeratik m kanal egoerara aldatzeko trantsizio probabilitateak ez dira kanal independenteko q_m egoera probabilitateen baliokideak. Modu honetan, kanal indepen-denterako emaitzat lortutako planifikazio estrategien errendimendua kanal korrelatu testuinguruan balioztatuko da.

Arestian esandako korrelazio hori 6.4 eta 6.5 Irudietan islatzen da. 6.4 Irudiak era-biltzaile baten CQI-en bilakaera denborala adierazten du, zeinetan denboran zeharreko kanal egoeren aldaketak kalitatean, aldamenean dagoen beste CQI mailetara ematen diren edota kanal egoera berean mantentzen dela beha daitekeen. Modu honetan, CQI balio bera duten jarraiko TTI kopuruari CQI *burstlength* deritzogu, eta gure agertokiaren simulazioan eman den CQI burstlength banaketaren alderantzizkoa 6.5 Irudian adie-razten da.



6.4 Irudia: Erabiltzaile baten CQI trazaren adibidea A_{16} ALTE agertokian.



6.5 Irudia: CQI burstlength-en CCDF-a A_{16} ALTE agertokian.

AId	MOS	Tamaina	Kanala	c
KATb	$d_{\min_1} = 0.05 \text{ s}, d_{\max_1} = 1 \text{ s}$ $c_{1_1} = 1, c_{2_1} = 1.33$	$\alpha_1 = 1.5, \gamma_1 = 4 \cdot 10^{-6}$ $\mathbb{E}[X_1] = 0.5 \text{ Mbit}$	$C = 10 \text{ Mbps}$	1
KAQ	$d_{\min_2} = 50 \text{ s}, d_{\max_2} = 100 \text{ s}$ $c_{1_2} = 27.57, c_{2_2} = 5.77$	$\alpha_2 = 1.5, \gamma_2 = 4 \cdot 10^{-9}$ $\mathbb{E}[X_2] = 500 \text{ Mbit}$	$C = 10 \text{ Mbps}$	1
KAK	$d_{\min_1} = 0.5 \text{ s}, d_{\max_1} = 10 \text{ s}$ $c_{1_1} = 4.07, c_{2_1} = 1.33$	$\alpha = 1.5, \gamma = 4 \cdot 10^{-7}$ $\mathbb{E}[X] = 5 \text{ Mbit}$	$16 C_k$ ikus 6.7 Taula	1
A_2 AKq	$d_{\min} = 0.5 \text{ s}, d_{\max} = 10 \text{ s}$ $c_1 = 4.07, c_2 = 1.33$	$\alpha = 1.5, \gamma = 4 \cdot 10^{-7}$ $\mathbb{E}[X] = 5 \text{ Mbit}$	$\text{CQI} = \{5, 9\}$ $q_{2_1} = 0.5$ $q_{2_2} = 0.9$	1
A_2 AKr	$d_{\min} = 0.5 \text{ s}, d_{\max} = 5 \text{ s}$ $c_1 = 3.79, c_2 = 1.73$	$\alpha = 4, \gamma = 6.66 \cdot 10^{-8}$ $\mathbb{E}[X] = 5 \text{ Mbit}$	$\text{CQI}_1 = \{5, 9\}$ $\text{CQI}_2 = \{9, 13\}$ $q_2 = 0.5$	1
A_2 AQc	$d_{\min_1} = 0.5 \text{ s}, d_{\max_1} = 10 \text{ s}$ $c_{1_1} = 4.07, c_{2_1} = 1.33$	$\alpha = 1.5, \gamma = 4 \cdot 10^{-7}$ $\mathbb{E}[X] = 5 \text{ Mbit}$	$\text{CQI} = \{5, 9\}$ $q_2 = 0.5$	{1, 5}
A_2 ATb	$d_{\min_2} = 0.5 \text{ s}, d_{\max_2} = 5 \text{ s}$ $c_{1_2} = 3.79, c_{2_2} = 1.73$	$\alpha_1 = 1.5, \gamma_1 = 4 \cdot 10^{-6}$ $\mathbb{E}[X_1] = 0.5 \text{ Mbit}$	$\text{CQI} = \{5, 9\}$ $q_2 = 0.5$	1
A_5 AKq	$d_{\min_2} = 5 \text{ s}, d_{\max_2} = 30 \text{ s}$ $c_{1_2} = 8.59, c_{2_2} = 2.23$	$\alpha_2 = 1.5, \gamma_2 = 4 \cdot 10^{-8}$ $\mathbb{E}[X_2] = 50 \text{ Mbit}$	1 klasea: ikus 6.5 Taula	1
A_{16} ALTE	$d_{\min_1} = 0.5 \text{ s}, d_{\max_1} = 10 \text{ s}$ $c_{1_1} = 4.07, c_{2_1} = 1.33$	$\alpha = 1.5, \gamma = 4 \cdot 10^{-7}$ $\mathbb{E}[X] = 5 \text{ Mbit}$	2 klasea: ikus 6.4 Taula	1
	$d_{\min_2} = 0.5 \text{ s}, d_{\max_2} = 5 \text{ s}$ $c_{1_2} = 3.79, c_{2_2} = 1.73$	$\alpha_1 = 1.5, \gamma_1 = 4 \cdot 10^{-7}$ $\mathbb{E}[X_1] = 5 \text{ Mbit}$	ikus 6.8 Taula	{5, 1}
	$d_{\min_2} = 5 \text{ s}, d_{\max_2} = 30 \text{ s}$ $c_{1_2} = 8.59, c_{2_2} = 2.23$	$\alpha_2 = 1.5, \gamma_2 = 4 \cdot 10^{-8}$ $\mathbb{E}[X_2] = 50 \text{ Mbit}$		

6.9 Taula: Parametro multzoa klase anitzeko kasuko agertokietan.

6.2 Errendimenduaren analisia kanal konstantean

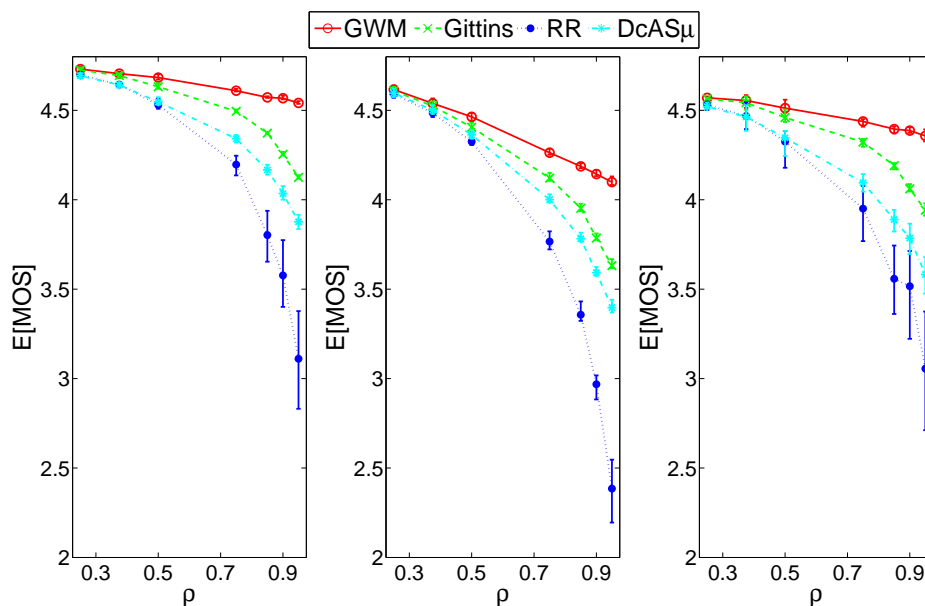
Behin balioztatze metodologia definituta, atal honetan kanal konstanteko errendimenduaren azterketa egiteari ekingo zaio, GWM planifikazio proposamena balioztatzeko xedearekin. Hasteko, 6.2.1 sekzioan tamaina banaketa ezberdina duten hiru kasu interesgarriren errendimendua aztertuko da, KBO, KBT_α eta KBT_b agertokiak analizatuko dira hain zuzen ere. Honekin batera, lortutako errendimendu metrika horien emaitzen analisia eta justifikazioa emango da politika ezberdinentzat atzerapen zein MOS funtzio estatistikoak ikuskatuz. Behin oinarrizko errendimendu analisia eginda, MOS funtzio oso latza duen KBQ agertokia ikasiko da 6.2.2 atalean. Bukatzeko, 6.2.3 puntuan, kanal kapazitatea handiagoa den kasuan, KBK agertokia, gure QoE-aware proposamenaren errendimendu emaitza konparatiboak mantentzen direla egiaztatzen da.

6.2.1 Tamaina mota desberdinetarako analisia

Jarraian lehenengo hiru agertokiaren (KBO , KBT_α eta KBT_b) errendimendu analisia burutuko da, simulazioen bidez lortutako batz besteko MOS-a, batz besteko atzerapena eta ekitatea analizatuz. Ikerketa hau kanal konstanteko gainontzeko agertokiaren errendimendu azterketaren oinarria izango da, eta geroagoa ikusiko den bezala, hiru agertoki horietan GWM-ek aurkezten duen portaera beste konfigurazioetan ere halaxe izango da. Gainera, atal honen azken azpi-atalean lortutako errendimendu metrika horien balioren justifikazioa azaltzen da bai atzerapen bai MOS banaketa estatistikoak analizatuz.

6.2.1.1 Batz besteko QoE analisia

Puntu honetan scheduling algoritmo desberdinek batz besteko QoE-an duten inpaktua aztertuko da. 6.6 Irudiak planifikazio diziplina ezberdinentzat batz besteko MOS-a sare kargaren menpe adierazten du. Hiru agertokientzat QoE patroia bera jarraitzen da, konfigurazio ez self-similarrean MOS balio baxuagoak erdietsiz orokorki. Beha daitekeenez, **sare karga guztientzat GWM gainontzeko politikak baino hobea da batz besteko kalitate subjektiboari dagokionez, QoE maila oso egokiak mantendu eta lortzen direlarik.** Aipagarria da Gittins-ek $DcAS_\mu$ QoE-aware politikak baino emaitza zertxobait hobek ematen dituela. Aurreko bi estrategia horiek emaitza onargarriak ematen badituzte ere, GWM-en hobekuntza nabaria da. Hala ere, RR anitz desberdintzen da gainontzeko politikengandik, zeinak orokorki MOS balio askoz baxuagoak ematen dituen, eta zeinaren QoE degradazioa nabarmenki hazten den sare karga handitzen den heinean.



6.6 Irudia: $E[MOS]$ KBO (ezkerrean), $KBT\alpha$ (erdian), $KBTb$ (eskuinean) agertokietan.

6.2.1.2 Batz besteko atzerapenaren analisia

Orain arte planifikazio diziplina ezberdinen errendimendua batz besteko QoE arloan ikertu da. Oraingoan estrategia horien portaera batz besteko atzerapenari dagokionez aztertuko da.

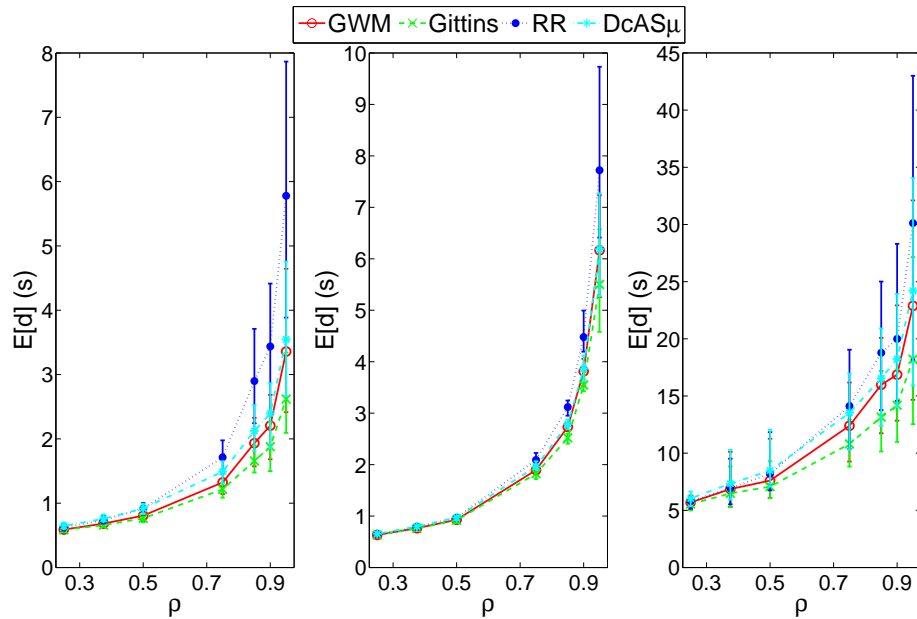
6.7 Irudiak sare kondizio eta planifikazio politika desberdinentzat batz besteko atzerapenaren emaitzak biltzen ditu. Espero zen bezala, Gittins aukerarik onena da batz besteko atzerapen terminoetan. Gittins kontsideratutako sare egoera guztietarako hobea den arren, diferentzia hau nabariagoa da ρ 0.5 baino handiagoa denean. Kasu ez self-similarrean bi QoE-aware estrategiek antzeko emaitzak ematen badituzte ere, gure proposamenak emaitza hobekiak erakusten ditu. Bestalde, RR-ek oro har portaera txarrean azaltzen du.

Laburbiduz, batz besteko atzerapenari dagokionez, tamainan bakarrik oinarritutako Gittins indize erregelak gure proposamenak baino errendimendu hobea erakusten du. Dena den, QoE arloan gure heuristika irabazlea da.

6.2.1.3 Ekitatearen analisia

Lehengoa QoE-aren zein atzerapenaren errendimendua batz bestekoan aztertzeaz aparte, kontsideratutako scheduling algoritmoen ekitatea lantzeko bi metrika horien Jain indizea etsaminatuko da ondorengoan.

QoE-aren ekitateari dagokionez 6.8 Irudiari begiratu. Erakusten den bezala, gure



6.7 Irudia: $\mathbb{E}[d]$ KBO (ezkerrean), KBT_α (erdian), KBT_b (eskuinean) agertokietan.

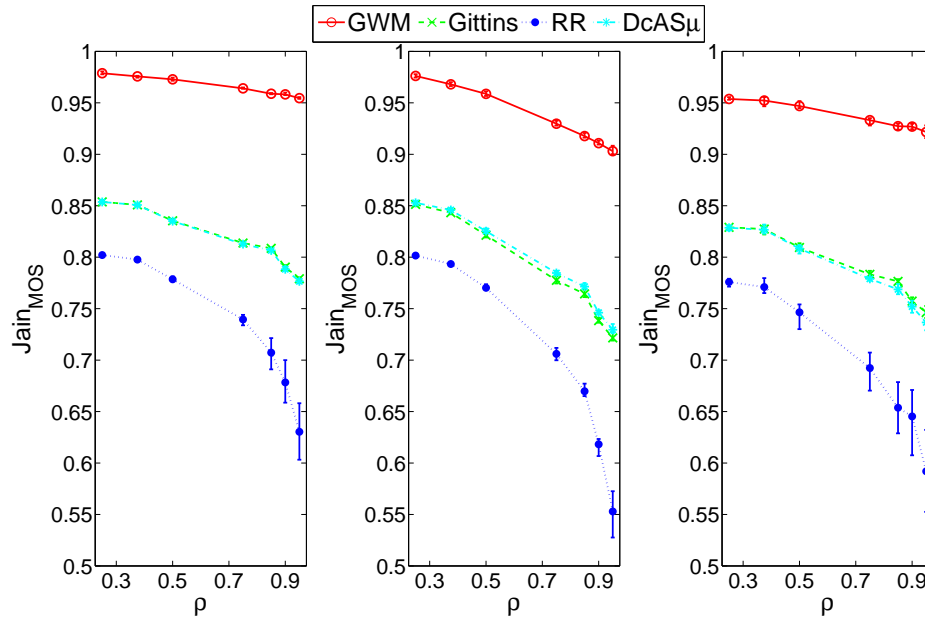
proposamenak ekitate ona azaltzen du; batetik, gainontzeko politikek baino Jain indize altuagoak ematen ditu, eta bestetik, ekitate maila egokia mantentzen du sare karga guttiarako. Gittins-ek eta DcAS_μ -k antzeko emaitzak ematen dituzte, eta bi horien errendimenduaren txarragotzea gure proposamenarekiko %10aren gainetik mantentzen da. Oraingoan ere RR-ek ez du QoE-a kontuan hartzen, portaera ez egokia erakutsiz. Bestalde, kasu ez self similarrean oro har indize horien balioak baxuagoak dira.

Ondorioz, gure **QoE-aware heuristika proposamena** ez da soilik **onena batz besteko QoE terminoetan**, baizik eta **QoE-aren ekitatean ere** aukera onena da.

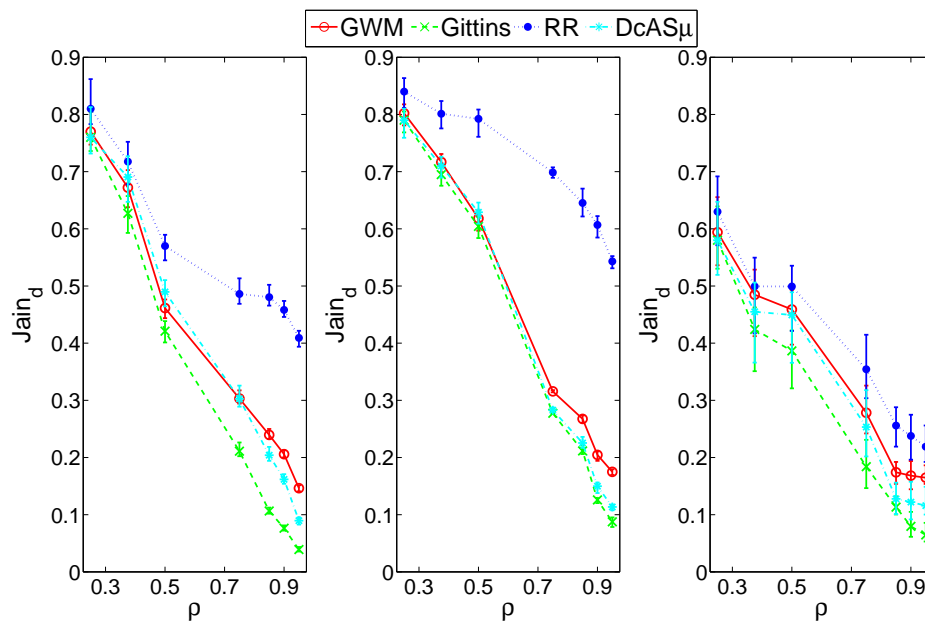
Atzerapenaren ekitateari dagozkion emaitzak 6.9 Irudian laburbiltzen dira. Espero zen bezala, RR atzerapenean inpartzialena da, gainontzeko diziplinengandik nahikotxo nabarmentzen delarik. Bestalde, gure proposamena, batz bestekoan ez bezala, Gittins baino hobea da; hau normala da, Gittins-ek fluxu luzeak zigortzen baititu. Bestetik, sare karga baxuetan DcAS_μ -k GWM berdindu edota gainditzen badu ere, ρ balio altuentzat gure proposamena beste QoE-aware diziplina baino justuagoa da.

6.2.1.4 Oinarrizko funtzionamenduaren azterketa

Aurreko hiru puntuetan lortutako errendimendu emaitzak ulertu edota justifikatzeko helburuarekin, atal honetan bai MOS-aren bai atzerapenaren banaketa estatistikoak landuko dira. Era honetan, simulazio emaitzetako metrika horien probabilitatearen dentsitate funtzioa (PDF) zein banaketa funtzioa (CDF) edota honen alderantzizkoa (CCDF)



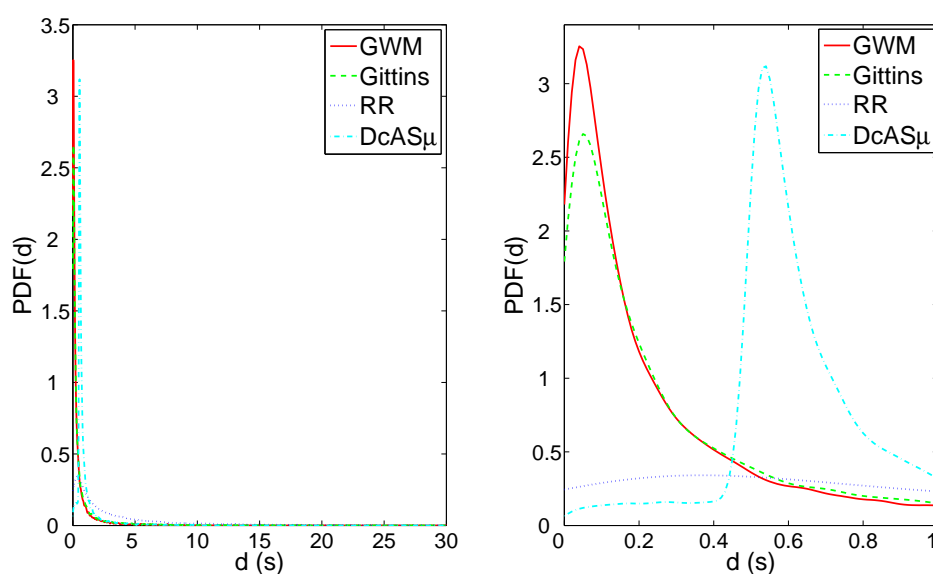
6.8 Irudia: Jain_{MOS} KBO (ezkerrean), KBT α (erdian), KBTb (eskuinean) agertokietan.



6.9 Irudia: Jain_d KBO (ezkerrean), KBT α (erdian), KBTb (eskuinean) agertokietan.

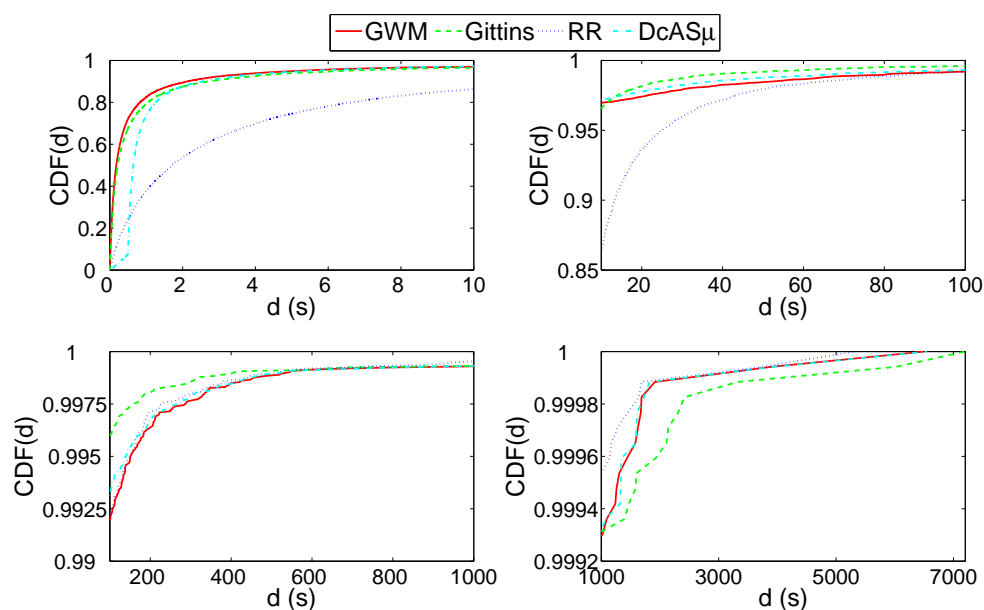
aztertuko dira. Horretarako, KBO agertokiko simulazio bat erakutsiko da adibide bezala, beste simulazio eta agertokietan portaera bera mantentzen dela egiaztatuko delarik. Gainera, sare karga altuena aztertuko da soilik, honek hobeki islatzen baititu scheduling politiken arteko diferentziak.

Lehenik eta behin, atzerapenaren estatistikoak analizatuko dira, eta gero, honen menpekoak edota ondoriozkoak diren MOS-aren estatistikoak. Modu honetan, hasteko 6.10 Irudian adierazten den atzerapenaren PDF-a aztertuko da, eskuineko grafikoak PDF horren d_{\min} -arteko zoom-a erakusten duelarik. Beha daitekeenez, atzerapen baxuetan probabilitate masa handiena GWM-ek erakusten du, Gittins-ek jarraitzen diolarik, hauen arteko aldea nabarmena delarik. Hala ere, d_{\min} -en ingurutik aurrera Gittins-ek GWM gainditzen du. Nahiz eta PDF-aren irudi horretan hain argi ikusten ez den, ezaguna da Gittins-ek atzerapen oso altuetan probabilitate maila nabaria duela beste politikekin alderatuta; dena den, portaera estatistikoa osorik atzerapen tarte osoan hobeto islatuko da gero CDF-a aztertzerakoan. Bestetik, $DcAS_{\mu}$ -ri dagokionez, atzerapena d_{\min} baino txikiagoa den arte probabilitatea nahiko txikia da, eta honen balioa izugarri igotzen da atalase balio horretan; hau koherentea da, politika horrek atzerapen behe-atalasea baino atzerapen txikiagoa duten erabiltzaileei lehentasun minimoa ematen baitie. Bestalde, nahiz eta atzerapenaren balio altuagoetan RR-ek atzerapenarekiko izaera beherakorra erakutsi, jaitsiera hau gainontzeko politikena baino askoz motelagoa izanik, diziplina horrek probabilitatearen balioa tarte berdinean mantentzen du atzerapen baxuentzat.



6.10 Irudia: Atzerapenaren PDF-a KBO agertokian ($\rho = 0.95$).

Arestian esandako guztia adierazteko beste era bat 6.11 Irudian azaltzen den atzerapenaren CDF-a da. Irudi horretan lau grafiko agertzen dira, atzerapenaren CDF-a tarte desberdinetan adierazten delarik. Lehenengo tarte (goi-ezkerreko grafikoa) d_{\max} -arteko emaitzak biltzen dira. Tarte horretan atzerapenaren balioa tarte horretako balio baten azpitik izateko probabilitate altuena GWM-ek ematen du. Gittins-ek, bere aldetik, atzerapen balio baxu horietan probabilitate altuak ematen ditu, baina beti gure proposamenaren azpitik. $DcAS_{\mu}$ inprobableena da d_{\min} -en baino lehen, eta ondoren, aurreko bi politiken kurbetara hurbiltzen da. Bestetik, RR-ek probabilitate baxuak erakusten ditu, bere igoera malda motela delarik. Bestalde, goi-eskuineko eta behe-ezkerreko grafikoen beha daitekeenez, 10 segundotik 600 segundo ingurura Gittins probableena da, $DcAS_{\mu}$ -k eta ondoren GWM-ek jarraitzen diotelarik. RR nahiko desberdintzen da gainontzeko politikengandik bigarren tarte, eta hirugarrenean, oster, QoE-aware diziplinen antzekoa da. Hala ere, azken grafikoa (behe-eskuinakoa), atzerapen oso altuen tarte edota atzerapenaren buztana adierazten du, zeinak argi uzten duen Gittins-ek atzerapen oso altu gehiago eragiten dituela gainontzeko politikekin alderatuta.



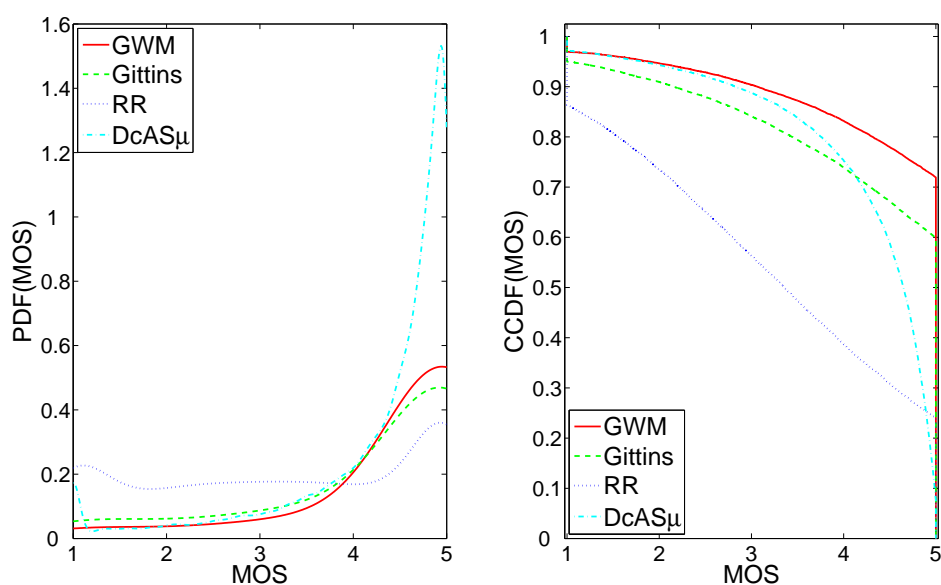
6.11 Irudia: Atzerapenaren CDF-a KBO agertokian ($\rho = 0.95$).

Laburbilduz, **GWM-ek atzerapen oso baxuak eragiten ditu, baina d_{\max} -etik aurrera atzerapenaren hazkundera ez zaio inporta.** Bi ezaugarri horiek batzaz besteko QoE-aren maximizazio helburuarekin bat datoz; batetik, atzerapen oso baxuetan MOS-a maximoa edota maximotik hurbil baitago, eta bestetik, d_{\max} -etik aurrera MOS-aren balioa minimoa baita. Hori dela eta, batzaz besteko atzerapenari dagokionez QoE-aware proposamen hori ez da optimoa, baina atzerapenaren ekitate terminoetan jokaera onargarria

erakusten du. Gittins estrategiak atzerapen baxuetan probabilitate masa handia sortzen du, eta honek batz besteko atzerapena minimizatzea lortzen du. Hala ere, atzerapenaren buztanean erakusten duen karga dela eta, diziplina horrek atzerapenaren fairness-an ez du emaitza onik ematen. Bestalde, $DcAS_{\mu} d_{\min}$ -arte oso inprobablea da, eta nahiz eta atalase horren inguruan izugarritzko probabilitate masa edo pikoa erakutsi, diziplina horren batz besteko atzerapena ez da hain txikia; beheko atzerapen atalasean horrenbeste probabilitate masa izateak politika horrek ekitateari dagokionez emaitza nahiko onargarriak erakustea eragiten du. Bukatzeko, RR probabilitatean nahiko homogeenoa azaltzen da atzerapen balio guztientzat, zeinak atzerapenaren fairness-an onena eta batz bestekoan txarrena izatea suposatzen duen.

Arestian deskribatutako scheduling estrategia desberdinek atzerapenean duten portaera estatistikoak hauen MOS-aren portaera estatistikoan eragin zuzena izango du, eta era berean, azkenengo horren ondoriozkoak diren QoE-aren batz bestekoan eta ekitatean. Modu honetan, 6.12 Irudiak MOS-aren funtzio estatistikoak biltzen ditu, zeinetan MOS-aren PDF-a zein CCDF-a erakusten diren. MOS-aren PDF-an beha daitekeenez, MOS maximotik hurbil $DcAS_{\mu}$ -k balio altuena erakusten badu ere, piko hori estua da, eta nahiz eta GWM-ek eta Gittins-ek balio baxuagoa erakutsi MOS tarte horretan, azkenengo bi horien balio horiek bitarte zabalagoan gertatzen dira. Ohartu $DcAS_{\mu}$ pikoa-
ren estutasun hori politika horrek d_{\min} -en inguruan atzerapenaren probabilitateak duen bat-bateko hazkundearen ondorioz dela; GWM-en eta Gittins-en, berriz, atzerapenaren balioa zerotik eta behe atalase balio horren artean dagoenean atzerapenaren probabilitate masa nabaria da, eta horrek MOS maximoa sortzen du. Era horretan, MOS-ak bere balio maximoaren inguruko balio bat izateko probabilitate altuena duen politika GWM da, eta hurrengoa Gittins. RR-ek balio nabarmenki baxuagoa erakusten du MOS maximoaren inguruan, diziplina horrentzat tarte horri dagozkion atzerapen balioak nahiko inprobableak baitira. Modu berean, beste muturra aztertzen badugu, MOS minimoaren inguruan bai $DcAS_{\mu}$ bai RR probableenak dira. Bitarteko MOS balioetan RR-ek gainontzeko politikak gainditzen ditu, oro har lehenik Gittins-ek, gero $DcAS_{\mu}$ -k, eta bukatzeko, GWM-ek jarraitzen diotelarik.

Aurreko guztia ikusita batz besteko MOS-aren zein honen ekitatearen emaitzak justifikatzeko gai gara. Gisa honetan, **GWM politikarentzat lortutako atzerapen oso baxuek eragindako MOS maximoaren inguruko probabilitate masa altuak QoE-aware politika horren batz besteko MOS-aren balioa gainontzeko estrategiena baino altuagoa izatea eragiten du.** Era berean, **probabilitate masa gehiena MOS altuetan izateak QoE-aren ekitateari dagokionez aukera onena izatea ere suposatzen du.** Gittins-en kasuan aurreko portaera leuntzen da, politika honi dagokion kurba MOS balio altuetan GWM-enaren azpitik eta MOS balio baxuetan gure proposamenaren gainetik ego-



6.12 Irudia: MOS-aren funtzio estatistikoak KBO agertokian ($\rho = 0.95$).

teak bataz besteko MOS baxuagoa sorrarazten duelarik. Bestetik, MOS balio baxuen tar-tean probabilitatea handitzeak, MOS-aren ekitatea txarragotzen du GWM-ekiko. Bestalde, DcAS μ diziplinari dagokionez, batetik, MOS balio altuen piko estuak, eta bestetik, MOS balio baxuen probabilitate handiak, politika horren QoE-ari dagokion errendimendua ez hain desiragarria izatea eragiten dute, bataz bestekoan zein ekitatean. DcAS μ -ren antzera, RR-ek muturretan duen jokabide ezegokia dela eta, beheko muturrean probabilitatea altua eta goiko muturrean probabilitatea baxua izanik, errendimendua QoE terminoetan ez da aproposa.

Beraz, lehenagoko azalpenen bidez aztergai diren errendimendu metriken emaitzak egokiro justifikatu dira. Dena den, horretaz gain, MOS-aren CCDF-ak erabiltzailearen satisfakzio atalase onargarriaren inguruan informazio interesgarria ematen duela aipatu beharra dago. Satisfakzio atalase horren gaintik hautemandako kalitatea onargarria dela esaten da. Molde honetan, bataz besteko MOS-az gain satisfakzio atalasearen gaintik egoteko probabilitatea zein den jakin nahi izatekotan, MOS-aren CCDF-a satisfakzio atalase balio horretan ebaluatzearekin nahikoa da. MOS-aren CCDF-a 6.12 Irudiko eskuineko grafikoan adierazten da. Bi kasu analizatu dira: lehenengo kasuan, satisfakzio atalasea 3 da, eta bigarren kasuan, exijenteagoak gara, MOS atalase hori 4 balioan finkatuz. Lehenengo kasua aztertzen badugu, MOS-aren balioa 3 baino handiago izateko probabilitate handiena duen politika GWM da, zeinak erabiltzaileen %92a inguru satisfakzio atalase horren gaintik egotea lortzen duen. Horri DcAS μ -k jarraitzen dio antzeko portzentaiarekin, %90 inguru, eta ondoren, Gittins-ek %85 inguru, eta azke-

na, RR da, emaitza askozaz txarragoak ematen dituena, %50 inguru. Bigarren kasuan, aitzitik, GWM-en hobekuntza beste politikekiko nabarmenagoa da. Horrela, kontsideratutako satisfakzio atalase horretarako portzentaia GWM diziplinarako gutxi jaisten da aurreko kasuarekin alderatuz, lortutako portzentaia %88 inguru izanik. Bestetik, Gittins-ek eta $DcAS\mu$ -k antzeko emaitza ematen dute, %75 inguru, eta RR-ek, berriz, %35 inguru. Beraz, azkeneko hiru diziplina horien satisfakzio portzentaia horien balioa nahiko gutxiagotzen da lehenengo kasuarekin konparatuta, eta GWM-ek gainontzeko planifikazio politikak gainditzen ditu %10ean baino gehiago.

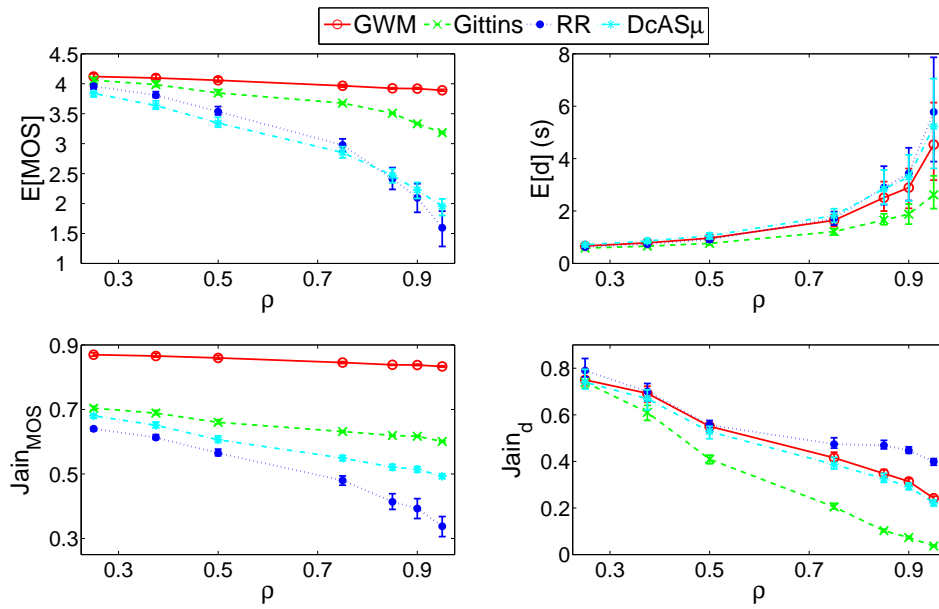
6.2.2 QoE drastikoaren kasuaren azterketa

Behin errendimenduaren oinarritzko azterketa eginda, puntu honetan planifikazio algoritmoen portaera MOS funtzioa latza deneko KBQ agertokia analizatuko da.

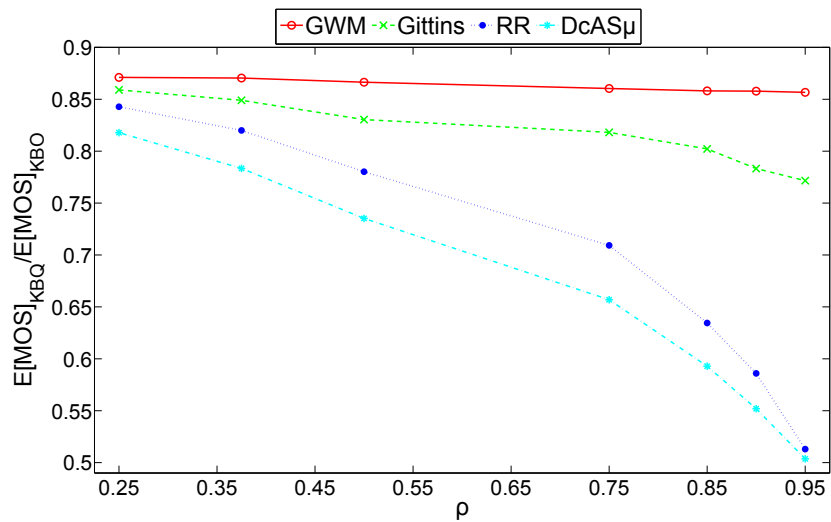
Agertoki horri dagozkion errendimendu emaitzak 6.13 Irudian jasotzen dira. Goi-erkerreko grafikoan erakusten denaren arabera, aurreko agertokiekin alderatuta politika guztien batz besteko MOS-a txarragotzen da, eta hori MOS-ak atzerapenarekin duen okerragotze drastikoaren ondoriozkoa da. Dena den, GWM-ek gainontzeko diziplinak hobetzeaz gain, batz besteko MOS-aren balio egokiak mantentzea lortzen du. Aipatzekoa da ere $DcAS\mu$ QoE-aware politikak portaera nahiko makala duela, ρ baxuetan RR baino desagokiagoa izanik eta ρ altuetan, oster, RR-en antzekoa. QoE-aren ekitateari dagokionez, ikus behe-erkerreko grafikoa, zeinetan honek ere txarrera egiten duela beha daitekeen. Hala ere, GWM-ek ekitate maila egokia lortzen du, beste politikak nabarmenki gainditzen dituelarik.

Modu honetan, 6.14 Irudian batz besteko QoE-ari dagozkion oinarritzko agertokiaren eta MOS latza erakusten duen agertoki horren emaitzak alderatzen dira. Ondorio bezala, **gure QoE-aware proposamena edozein MOS funtziotara egokitzen dela esan daiteke**. Hau da, gainontzeko diziplinetan QoE-aren utilitate funtzioak eragindako degradazio bortitzen efektu negatibo nabariak azaltzen badira ere, GWM-ek hori ekiditea lortzen du QoE maila egokiak eskuratuz, dagokion MOS funtziora egokitzen delarik.

Bestalde, nahiz eta konfigurazio baten QoE ezaugarriak aldatu, aldaketa horrek ez du eraginik izango QoE-a kontuan hartzen ez duten estrategien atzerapenaren metriketan. Hau da, QoE-aware ez diren planifikazio politikentzat atzerapenaren ikuspuntutik KBO eta KBQ agertokiak baliokideak dira. Hori guztia 6.13 Irudiko eskuineko bi grafikoetan islatzen da, zeinetan diziplina horientzat lortutako bai batz besteko atzerapena bai atzerapenaren Jain indizea oinarritzko agertokiko atzerapenaren emaitzen oso antzekoak diren. Bestetik, QoE-aware politiken atzerapenaren metrikei dagokienez, aurreko agertokien tendentzia jarraitzen da ere, eta horiekin erkatuta ez da desberdintasun aipagarriarik aurkitu.



6.13 Irudia: Errendimendu metriken emaitzak KBQ agertokian.



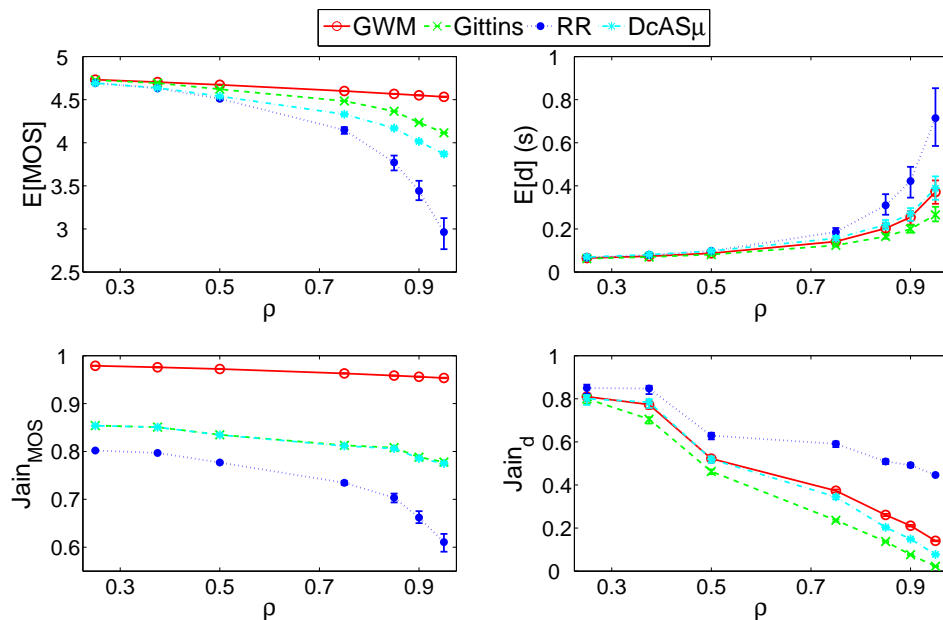
6.14 Irudia: KBQ eta KBO agertokien arteko $E[MOS]$ erkaketa.

Laburbilduz, bataz besteko atzerapen txikiena Gittins-ek ematen du berriro, gure proposamena RR baino hobea izanik bataz bestekoan. Bestetik, atzerapenaren fairness-aren ikuspuntutik, RR irabazlea izaten jarraitzen du, GWM-ek Gittins gainditzen duelarik.

6.2.3 Beste kanal kapazitate baterako azterketa

Orain arte aztertutako agertokietan kanal kapazitate bera kontsideratu da, eta oraingoan aurreko konfigurazioekin alderatuta hamar aldiz handiagoa den kanal kapazitatea duen agertokiaren errendimenduaren analisia egingo da.

KBK agertokiari dagozkion errendimendu emaitzak 6.15 Irudian laburbiltzen dira. Ondorio nagusi bezala lortutako emaitzak jada aztertutako agertokietan lortutakoekin bat datozela esan genezake. Hau da, aztergai diren lau errendimendu metrika horietako bakoitzaren barruan planifikazio politikak aurreko agertokiaren ordena berean ordenatzen dira onenetik txarrenera. Gainera, oinarrizko KBO agertokiarekin alderatuta diziplinen arteko diferentziak nahiko antzekoak dira lau metrikentzat. Bestetik, nahiz eta kanal kapazitatea altuago izateak bataz besteko atzerapena nabarmenki txikiagotu (ikus goi-eskuineko grafikoa), atzerapen atalaseen balioa kapazitate horretara egokitzeak MOS maila berdinak mantentzea eragiten du (goi-ezkerreko grafikoa). Bestalde, beheko grafikoeetan adierazten denaren arabera, Jain indizeen balioak oro har KBO agertokioenen oso antzekoak dira.

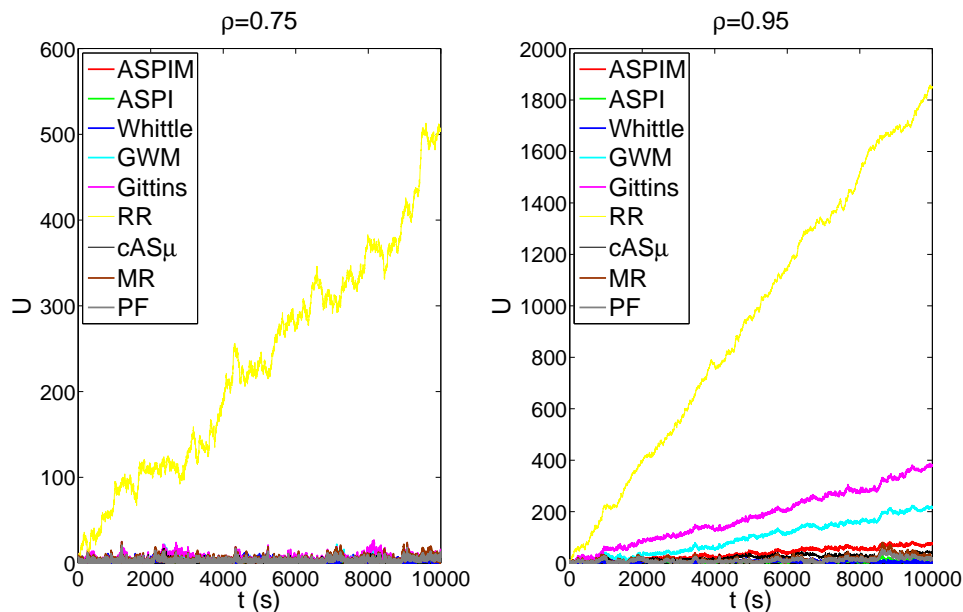


6.15 Irudia: Errendimendu metriken emaitzak KBK agertokian.

6.3 Errendimenduaren analisia kanal aldakorrean

Aurreko atalean kanal konstanterako errendimenduaren azterketa burutu eta gero, sekzio honetan kanal aldakorrerako errendimenduaren analisia egingo da, proposatutako scheduling indize erregelen balioztatzea egiteko helburuarekin. Lehenik eta behin, 6.3.1 sekzioan, bi kanal egoera soilik kontsideratzen dituzten lehenengo sei agertokiak analizatuko dira. Ondoren, 6.3.2 atalean, kanal kopurua bi baino handiagoa deneko beste bi agertokiak ikasiko dira.

Bestaldetik, errendimenduaren azterketarekin hasi aurretik, aipatzekoa da simulazio hauetan QoE-aware-a den $DcAS_{\mu}$ politika ez dela kontuan hartuko, kanal konstantean bataz bestekoarekiko zein fairness-arekiko hobekuntzarik ematen ez baitu. Horretaz aparte, 6.16 Irudian beha daitekeenez, geroago aztertuko den kanal aldakorreko A_2BO oinarrizko agertokia adibidetzat hartuta, RR diziplina erabat ezegonkorra da U hizkiaz adierazten den erabiltzaile kopuruarekiko, baita sare karga ertainetan ere. Honekin batera, Gittins-ek ere ρ altuetan nahiko emaitza okerrak ematen ditu. Sistemako erabiltzaile kopurua denboran zehar izugarri igotzeak atzerapenak zein MOS-ak handitzea eragingo du, eta hori dela eta, bai RR bai Gittins diziplinen ikasketa ere baztertu egingo da. Bestetik, gainontzeko politikekin alderatuta, RR eta Gittins kenduta, GWM-ek nabarmenki txarragoa badirudi ere, diziplina hori QoE-aware-a izanik, erabiltzaile kopuruarekin estuki erlazionatuta ez dagoen QoE-an duen eragina ikusteko simulazioetan mantenduko da.



6.16 Irudia: Erabiltzaile kopuruaren bilakaera denborala oinarrizko agertokian.

6.3.1 Bi kanalen kasurako analisia

Sekzio honetan, aztergai diren scheduling algoritmoen errendimendua kanal kondizioak bi egoera ditueneko kasuan aztertuko da. Lehenik eta behin, A_2BO oinarrizko agertokia analizatuko da 6.3.1.1 puntuan, zeinetan eskuratutako errendimendu metrikan aztertzeaz gain, politika desberdinentzat lortutako emaitzen justifikazioa emango den bai MOS-aren bai atzerapenaren estatistikoak ikuskatuz. Kanal aldakorrerako errendimendu azterketa elementala egin ondoren, kanal probabilitate ezberdinak dituen A_2BKq agertokia aztertuko da 6.3.1.2 azpi-atalean, beste kanal kapazitate batzuk dituen A_2BKr agertokia analizatzen delarik 6.3.1.3 puntuan. Ostean, QoE drastikoaren kasuko A_2BQ agertokia 6.3.1.4 azpi-atalean lantzen da. Jarraian beste batz besteko taimaina bat kontsideratzen duen A_2BTb agertokiaren errendimendu analisia egingo da 6.3.1.5 puntuan. Bukatzeko, ON-OFF kanal kasu berezia adierazten duen $A_2BOnOff$ agertokia aztertuko da 6.3.1.6 azpi-atalean.

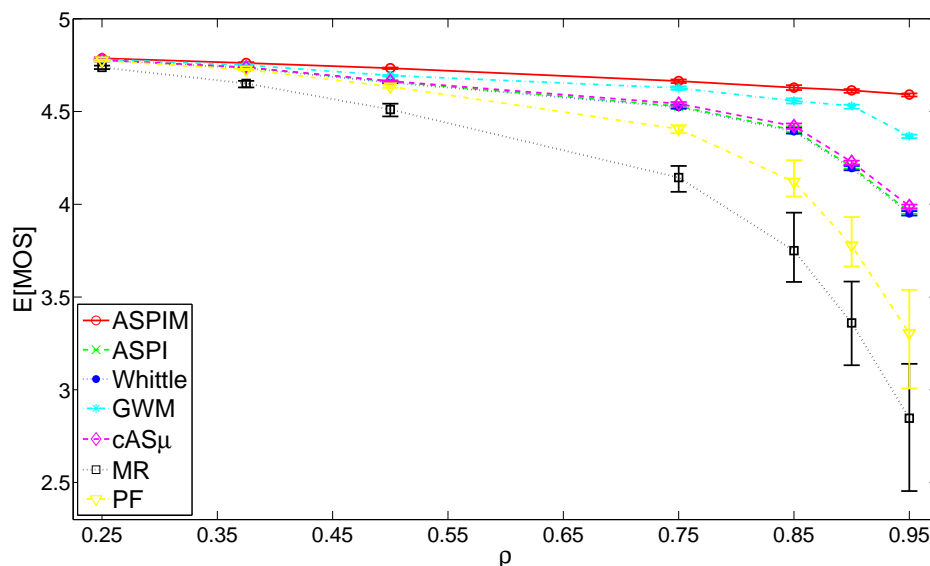
6.3.1.1 Oinarrizko kasuaren azterketa

Ondorengo lerroetan kanal aldakorreko oinarrizko A_2BO agertokiaren errendimendua-analisia egingo da. Horretarako, kontsideratutako lau errendimendu metriken simulazioen emaitzak aztertzeaz gain, 6.2.1.4 azpi-atalean egindakoaren antzera, metrika horien balioen justifikazioa emango da sekzio honen azken puntuan. Era honetan, atal honetako azterketa kanal aldakorreko errendimendu analisiaren oinarria izango da, eta gure planifikazio proposamenek hemen erakusten duten portaera beste agertokietan ere ematen dela ikusiko da geroago.

6.3.1.1.1 Batz besteko QoE analisia

Puntu honetan scheduling algoritmoek batz besteko QoE-ari dagokionez erakusten duten portaera landuko da. Modu honetan, 6.17 Irudian planifikazio politika desberdinentzat batz besteko MOS-aren emaitzak biltzen dira sare karga balio ezberdinetarako. Emaitza horietatik ateratako ondorio nagusia **batz besteko kalitate subjektiboari dagokionez ASPIM-ek gainontzeko politikak gainditzten dituela** da, kanal konstanteko QoE-aware GWM diziplina baino hobea izanik. Horrez gain, beste diziplinek ez bezala, ASPIM-ek batz besteko MOS-en balioak sare karga guztientzat maila berean mantentzea lortzen du. GWM-k batez ere, eta ondoren $cAS\mu$ -k, ASPI-k eta Whittle-k, emaitza onargarriak ematen badituzte ere, ASPIM-ek lortutakoak ezin hobekak dira; gainera, geroago ikusiko denez, gure QoE-aware proposamen berri honek QoE-aren fairness-a ere bermatzen du. Bestetik, PF eta MR politikek portaera txarragoa erakusten dute, bi horietan, MR diziplinan batz ere, ρ altuetan QoE-aren degradazioa nabariagoa izanik

gainontzeko planifikazio estrategiek alderatuta.



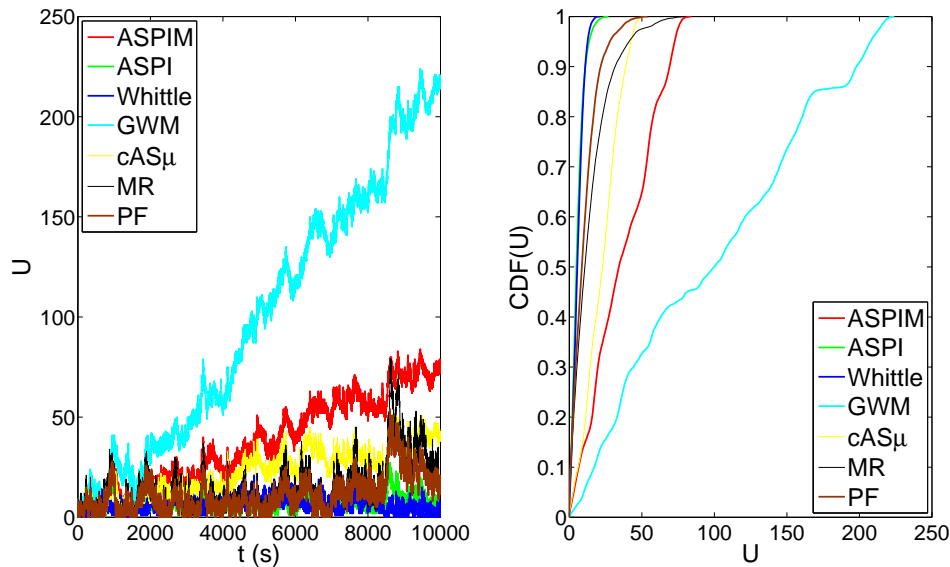
6.17 Irudia: \mathbb{E} [MOS] A_2BO agertokian.

6.3.1.1.2 Bataz besteko atzerapenaren analisisa

Arestian errendimendu analisisa bataz besteko QoE-aren inguruan egin da, eta oraingoan, planifikazio politiken portaera bataz besteko atzerapen arloan aztertzeari ekingo zaio.

Bataz besteko atzerapena sistemako erabiltzaile kopuruarekin zuzenki erlazionatuta dagoela jakina izanik, 6.18 Irudian kontsideratutako sare karga altuenarentzat erabiltzaile kopuruaren bilakaera denborala zein erabiltzaile kopuruaren banaketa funtzioa adierazten dira, ezkerreko grafikoan eta eskuineko grafikoan hurrenez hurren. Bi grafiko horietatik erabiltzaile kopuruari buruzko antzeko informazioa ateratzen da, eskuineko grafikoa nolabait argiagoa izanik. Gainontzeko diziplinekin alderatuta Whittle-k eta ASPI-k erabiltzaile kopurua minimizatzen dutela beha daiteke, Whittle ASPI baino pixkatxo bat hobetagoa izanik; esate baterako, Whittle-n oinarritutako bi politika horientzat erabiltzaile kopurua 15 inguru baino txikiagoa izateko probabilitateak %10ean gaintzen du PF, eta gainontzeko politikak %30ean baino gehiago. Bestetik, nabarmentzekoa da ere, QoE-aware politikentzat erabiltzaile kopurua altuagoa dela, GWM-entzat batez ere. Hala ere, bataz besteko QoE-aren emaitzak ikusita sisteman denbora gehiago diharduten erabiltzaile horiek ez dute bataz besteko MOS-a gehiegi okerrago-tzen. Hau da, antza denez, sisteman metatzen diren erabiltzaileak QoE-an saturaturik daude, eta QoE-aware politika horiek bataz besteko MOS-a maximizatzen saiatzen di-

ra gainontzeko erabiltzaileei lehentasuna emanaz. Dena den, QoE-aren inguruko hori guztia sakonago azalduko da 6.3.1.1.4 azpi-atalean.



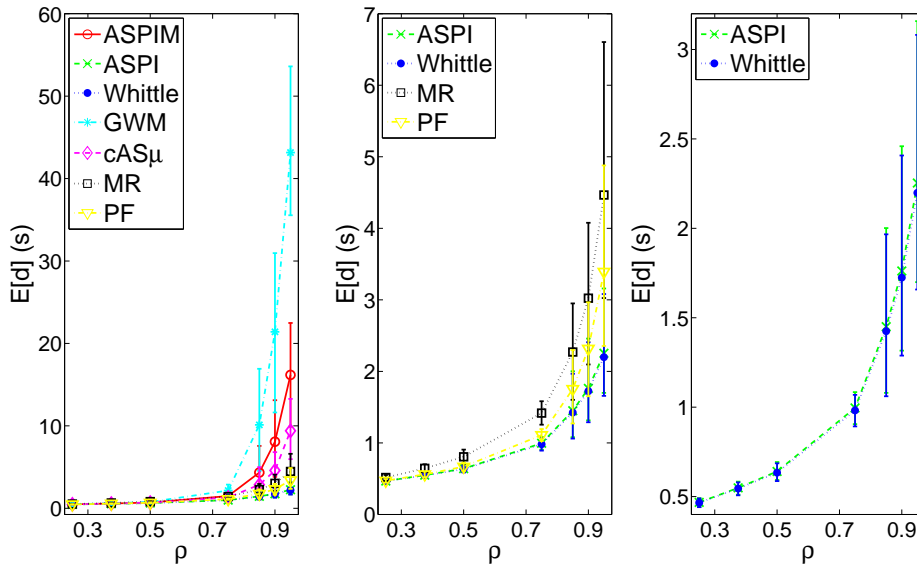
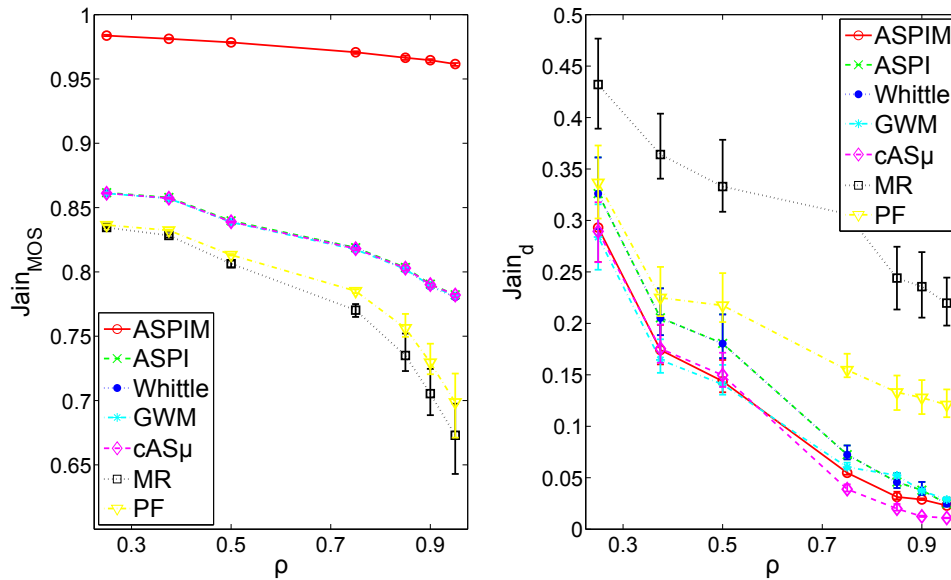
6.18 Irudia: Erabiltzaile kopuruaren bilakaera denborala (ezkerrean) eta CDF-a (eskuinean) A_2BO agertokian $\rho = 0.95$ denerako.

Bestalde, 6.19 Irudian scheduling diziplina ezberdinentzat batz besteko atzerapena sare kargaren menpe azaltzen da, zeinetan gainontzeko politikekin konparatuz, **Whittle-k eta ASPI-k batz besteko atzerapena minimizatzen dutela** ondorioztatzen den. Gainera, Whittle eta ASPI-ren arteko aldea oso txikia da, ρ -ren balioa txikiagotzen den heinean diferentzia are gehiago gutxiagotzen delarik. Bestetik, GWM nabarmenki txarrena da, eta baita ASPIM-ek ere (cAS μ -k ere) batz besteko atzerapen altuak ematen dituela esan genezake.

6.3.1.1.3 Ekitatearen analisia

Behin scheduling algoritmoen errendimendua QoE-aren zein atzerapenaren batz bestekoan analizatuta, ondorengoan planifikazio estrategien bai QoE-aren bai atzerapenaren ekitatea landuko da. Gisa honetan, fairness-ari dagozkion emaitzak 6.20 Irudian laburbiltzen dira.

Ezkerreko grafikoan erakusten denaren arabera, **QoE-arekiko fairness gehien ematen duen diziplina ASPIM** da, politika horren MOS-aren Jain indizearen balioa 0.95 baino handiagoa izanik ρ altuenean ere. GWM, cAS μ , Whittle eta ASPI diziplinek QoE-aren ekitate metrikaren oso balio antzekoak ematen dituzte, eta euren balioa ASPIM-ena baino %10ean baino gehiago okerragotzen da, sare karga handitzeak horien balioaren

6.19 Irudia: $\mathbb{E}[d]$ A_2BO agertokian.6.20 Irudia: Jain_{MOS} (ezkerrean) eta Jain_d (eskuinean) A_2BO agertokian.

txikiagotzean eragin gehiago izanik. QoE-aren fairness-aren inguruan emaitza txarrenak PF eta MR politikek erakusten dituzte. Atzerapenaren ekitateari dagokionez, ikusi eskuineko grafikoa, zeinetan politika guzientzat lortutako emaitzak nahiko txarrak diren; horren arrazoi nagusia kanal kapazitatearen aldakortasuna bera dela esan genezake. Aukerarik onena MR izanik, PF-ek jarraitzen diolarik, lortzen den atzerapenaren

Jain indizearen baliorik altuena 0.45 ingurukoa da.

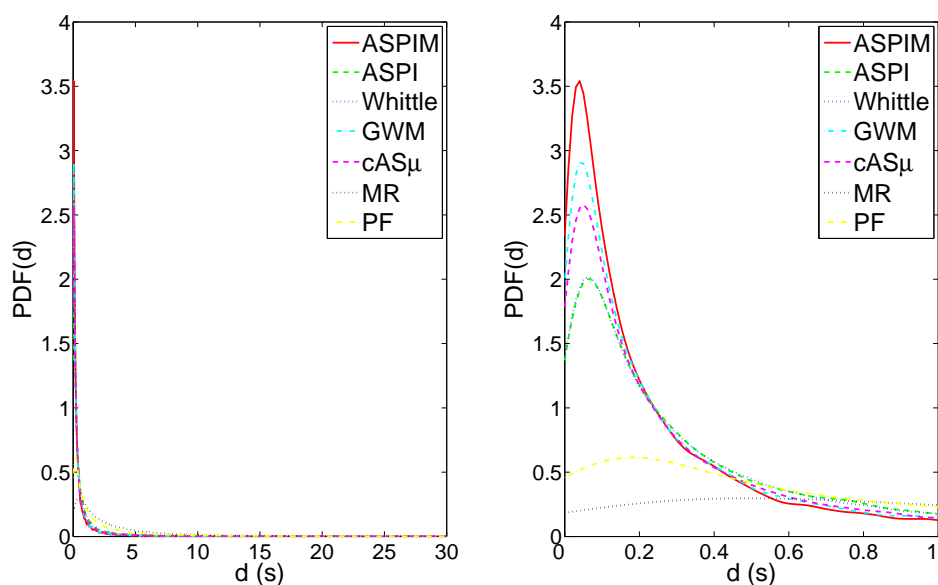
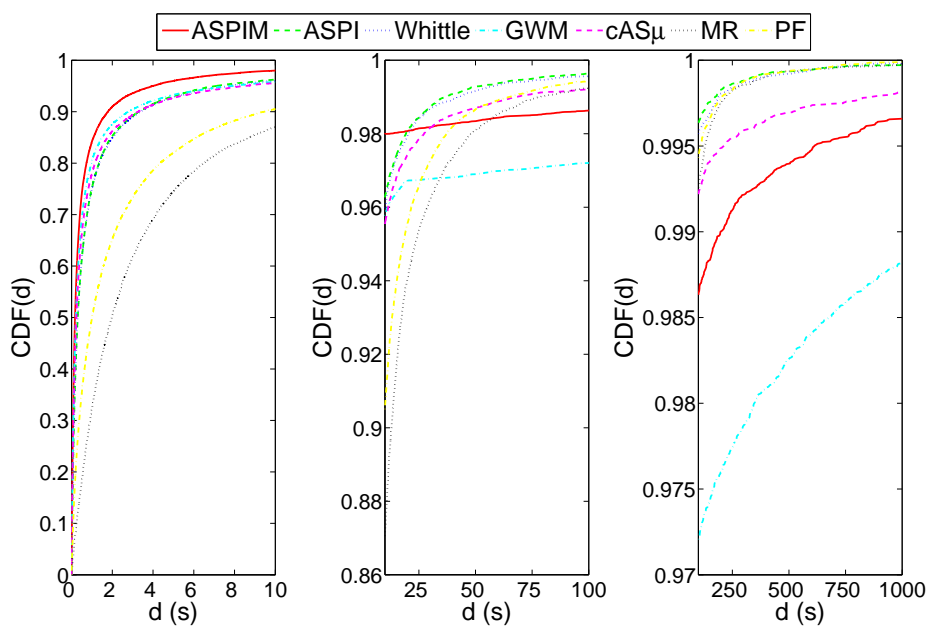
6.3.1.1.4 Oinarrizko funtzionamenduaren azterketa

Lehenagoko hiru puntuetako errendimendu emaitzak justifikatzeko asmoz, 6.2.1.4 puntuan burututakoaren antzera, sekzio honetan MOS-aren zein atzerapenaren estatistikoak analizatuko dira. Horretarako, kanal aldakorreko oinarrizko agertokiko simulazio bat adibidetzat hartuta, konfigurazio horren emaitzen atzerapenaren PDF-a eta CDF-a, eta MOS-aren PDF-a eta CCDF-a aztertuko dira sare karga altuenean.

Era honetan, 6.21 Irudiko atzerapenaren PDF-a aztertzen badugu, zenbait scheduling diziplinentzat atzerapen txikietan azaltzen diren probabilitate masak edo pikoak azpimarratzekoak dira. Politika bati dagokion hasierako piko horren altuerak eta zabalera batz besteko MOS-ean eragin zuzena izango dute, piko horiek MOS funtzioaren atzerapenaren behe-atalasea (0.5 s) baino lehen agertzen baitira. Aurkeztutako hasierako piko horien artean altuena eta zabalena ASPIM-ena da, indize erregela horrek batz besteko QoE-aren maximizazioa lortzea bilatzen duelarik. Hurrengo pikorik altuena QoE-aware GWM-ena da, $cAS\mu$, ASPI eta Whittle jarraitzen diotelarik, baina horiek guztientzat ASPIM-enarekin duten aldea nabaria da. Beraz, kanal konstantean bezala, **QoE-aware politikek ahalik eta fluxu gehien d_{\min} baino lehen bukatzen saiatzen direla dirudi**, eta hori atzerapenaren probabilitate masa gehiena atzerapenaren behe-atalase horren aurretik agertzen delakoan islatzen da. Bestetik, MR-ek eta PF-ek probabilitate dentsitate lauagoa adierazten dute, pikorik gabe, eta horrek atzerapenaren fairness-an irabazleak izatea eginarazten du, hala nola batz besteko atzerapenaren balio ertainak lortzea.

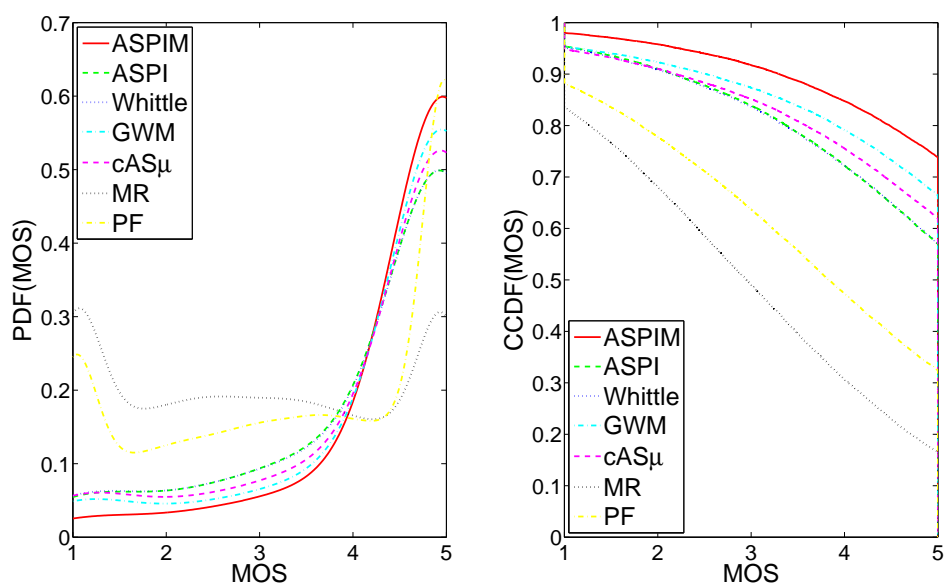
Dena den, planifikazio estrategia ezberdinen batz besteko atzerapenaren justifikazioa argiago erakusten da 6.22 Irudian, zeinetan atzerapenaren CDF-a tarteka adierazten den. Hasierako tartean, d_{\max} arte, ASPIM-ek nabarmenki gaintzen ditu gainontzeko politikak. Baina hurrengo tartean behatzen da nola batz besteko atzerapenaren minimizaziorako proposatutako Whittle-n oinarritutako diziplinek atzerapena baxuagoa izateko probabilitate altuena ematen dutela, eta beraz, horrek bi indize erregela horiek batz besteko atzerapena minimizatzea eragingo du. Gainera, bigarren tartetik aurrera argi ikusten da QoE-aware politikek, eta $cAS\mu$ -k ere, batz besteko atzerapen altuagoak izango dituztela, tarte horietan diziplina horien atzerapena txikiagoa izateko probabilitateen balioak askoz baxuagoak dira eta.

Arestian scheduling algoritmo desberdinentzat atzerapenaren estatistikoei buruz ondorioztatutakoak islapen zuzena izango du QoE-aren estatistikoetan. Modu honetan, MOS-aren estatistikoak 6.23 Irudian laburbiltzen dira. MOS-aren PDF-an beha daitkeenez, ezkerreko grafikoa, xedea batz besteko QoE-a maximizatzea bada, batetik,

6.21 Irudia: Atzerapenaren PDF-a A_2BO agertokian ($\rho = 0.95$).6.22 Irudia: Atzerapenaren CDF-a A_2BO agertokian ($\rho = 0.95$).

MOS maximoaren inguruko pikoaren altuerak eta zabalerak handiak izateak, eta bes-tetik, MOS minimoaren inguruan balioa baxua izateak garrantzia handia dute. Ezau-garri positibo horiek ASPIM-ek ditu, QoE-aren batz bestekoan onena izanik. Horrez gain, probabilitate masa gehiena MOS maximoaren inguruan izateak QoE-aren fairness-

a bermatzen du. GWM, Whittle, ASPI eta $cAS\mu$ -ren MOS-aren PDF kurbek ASPIM-enarenaren forma berbera badute ere, euren balioa MOS minimoaren inguruan altuagoa eta MOS maximoaren inguruan baxuagoa da ASPIM-ekin alderatuta, diziplina horien batz besteko MOS-ak zein MOS-aren Jain indizeak baxuagoak izatea eragingo duena. MR-en eta PF-en kasuan probabilitatea MOS minimoan nahiko altua da, MR-en kasuan MOS maximoarenaren oso antzekoa, eta horrek bi politika horien bai QoE-aren batz bestekoan bai fairness-an emaitzak ezegokiak izatea ekartzen du.



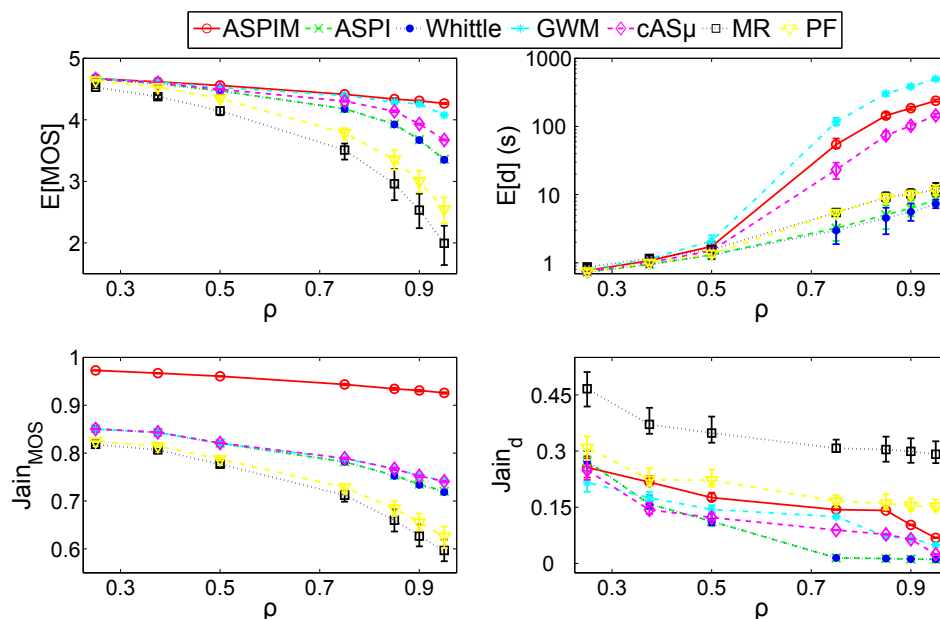
6.23 Irudia: MOS-aren funtzio estatistikoak A_2BO agertokian ($\rho = 0.95$).

Bukatzeko, eskuineko grafikoan MOS-aren CCDF-a aztertzen bada, ASPIM nabarmenki irabazlea dela ikusten da, eta hortaz, politika horren MOS balioak altuagoak izateko probabilitatea handiagoa da. Batz besteko QoE-an gainontzeko politikak gainditzen dituzten bi QoE-aware ASPIM eta GWM politikak erkatuz, $MOS = 4$ QoE atalase onargarritik aurrera lehenengoak %10 inguruko hobekuntza ematen du. Kasu horretan, ASPIM Whittle edota ASPI-rekin konparatuz desberdintasuna %20 ingurukoa da, eta MR eta PF bezalako channel-aware politikekin alderatuz, azkenengo bi horien txarrazotzea %50a baino handiagoa da.

6.3.1.2 Kanal probabilitate ezberdinetarako azterketa

Errendimenduaren oinarritzko analisia burutu eta gero, jarraian kanal probabilitateak ekiprobableak ez direnen kasua aztertuko da, A_2BKq agertokia hain zuzen ere. Kanal txarraren probabilitatea onarena baino bederatzi aldiz handiagoa izateak, oinarritz-

ko agertokiarekin alderatuta, errendimendua oro har txarragoa izatea eginaraziko du. Agertoki horren inguruko errendimendu metriken emaitzak 6.24 Irudian azaltzen dira. Irudi horretan beha daitekeenez, lortutako emaitzak okerragoak dira orokorrean, batz besteko atzerapenari dagokionez batez ere.



6.24 Irudia: Errendimendu metriken emaitzak A_2BKq agertokian.

Goi-ezkerreko grafikoan adierazten denaren arabera, kasu ekuipablearekiko batz besteko MOS-en balioak jaitsi egiten dira, baina politiken onenetik txarrenerako ordena berdina da, ASPIM-ek gainontzeko diziplinak gaintitzen jarraitzen duelarik. Gainera, ASPIM-ek QoE maila egokiak mantentzen ditu, bere sare kargarekiko menpekotasuna baxua izanik. Bestetik, batz besteko atzerapena minimizatzea helburutzat duten Whittle-n oinarritutakoak eta cAS μ gehiago bereizten dira, cAS μ hobetua izanik. Horrez gain, aipatzekoa da ρ altuenean MR-entzat MOS-aren balioa 2ra jaisten dela.

Bestalde, goi-eskuineko grafikoan ikusten denez, batz besteko atzerapena eskala logaritmikoan adierazten dena, batz besteko atzerapena biziki igotzen da QoE-aware politikentzat eta cAS μ diziplinarentzat. Dena den, scheduling algoritmoen ordena mantentzen da, eta hortaz, QoE-aware-ak ez diren Whittle-n oinarritutakoak aukerarik onenak izanik.

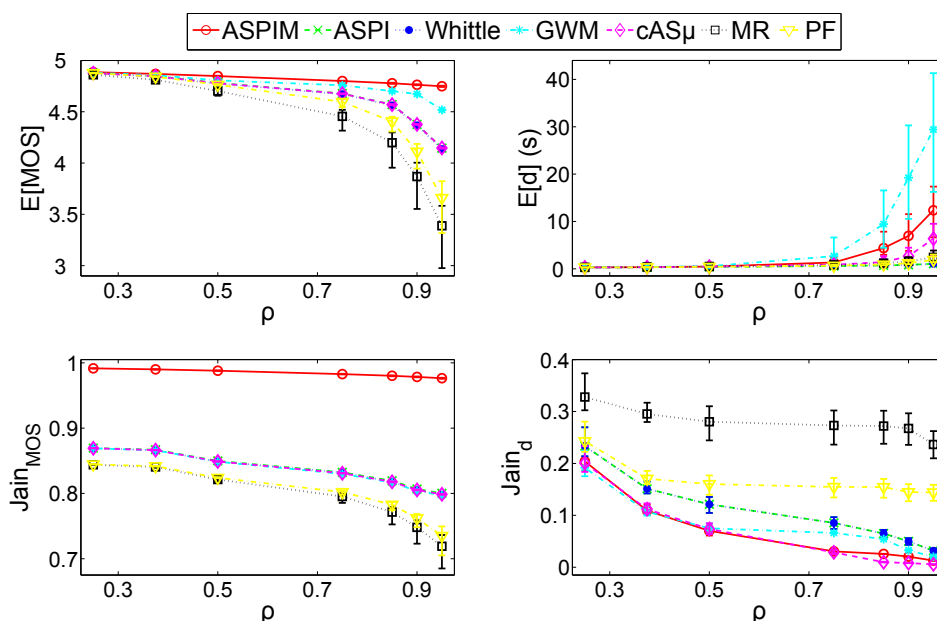
Fairness-ari dagozkion emaitzak beheko grafikoetan adierazten dira. QoE-aren ekitatea (behe-ezkerreko grafikoa) zertxobait txarragoa bada ere, ASPIM-en kasurik txarrenera MOS-aren Jain indizearen balioa 0.95 ingurukoa da. Oraingoan ere oinarritutako konfigurazioko politiken onenetik txarrenerako ordena mantentzen da. Bestaldetik, atzerapenaren fairness-ean (behe-eskuineko grafikoa) diziplinen ordenean desberdin-

tasunak egonik, MR hoberena izaten segitzen du. Horretaz aparte, zenbait politiken okerragotzea agerikoa da, atzerapenerako Whittle-n oinarritutakoak txarrenak izanik.

6.3.1.3 Beste kanal kapazitateetarako azterketa

Oraingoan kanal onaren abiadura lau aldiz txarrarena dela kontsideratzen duen A_2 BK_r agertokia analizatuko da. **Kanal onaren abiadura altuagoa izatearen ondorioz ASPIM eta ASPI diziplinen kanal txarreko indizearen kalkuluan onartutako hurbilketaren eta sinplifikazioen errorearen handitzea gertatzen bada ere, jarraian bi politika horien errendimendua esperotako aspektu guztietan egokia dela erakutsiko da.**

A_2 BK_r agertoki horren errendimendu metriken emaitzak 6.25 Irudian laburbiltzen dira. QoE-ari dagokionez, bai bataz bestekoan bai ekitatean, goi-ezkerreko eta behe-ezkerreko grafikoak hurrenez hurren, orain arteko politiken onenetik txarreneko ordena mantentzen da. Bataz besteko MOS-en balioak biltzen dituen grafikoan azaltzen denaren arabera, kanal onaren abiadura handiagoa izategatik bataz besteko QoE-a pixka bat igotzen da. Era berean, QoE-aren fairness-a ere hobetzen da, ASPIM-en Jain indizearen balioa bat ingurukoa izanik.



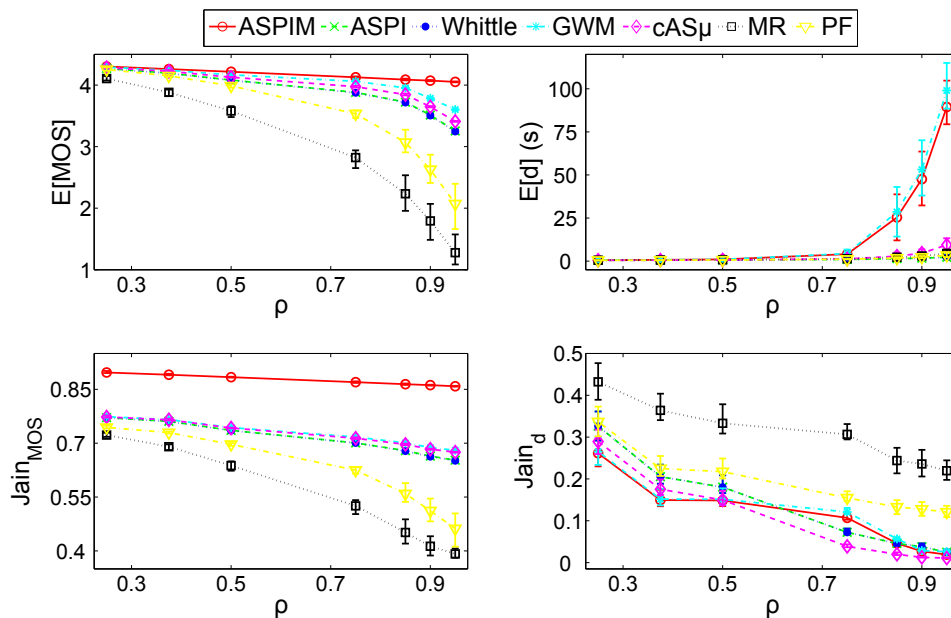
6.25 Irudia: Errendimendu metriken emaitzak A_2 BK_r agertokian.

Bestalde, kanal abiadura altuagoak izateak bataz besteko atzerapena txikiagotzea eragiten du, goi-eskuineko grafikoan islatzen den bezala. Gainera, bataz besteko atzerapen metrikarekiko politiken ordena ere mantentzen da, atzerapena minimizatzea helburutzat duten Whittle-n oinarritutakoak irabazleak izanik. Bestetik, atzerapenaren

fairness-ari dagokionez, ikus behe-eskuineko grafikoa, politiken ordena oro har berdintsu mantentzen dela esan genezake. Horrez gain, oinarrizko konfigurazioarekin erkatuz, orokorrean ρ baxuentzat Jain indizeen balioak jaisten dira, baina ondoren sare karga handitzen den heinean indize horien balioen txikiagotzearen malda gutxitzen da, ρ altuetan emaitza hobek eskuratuz.

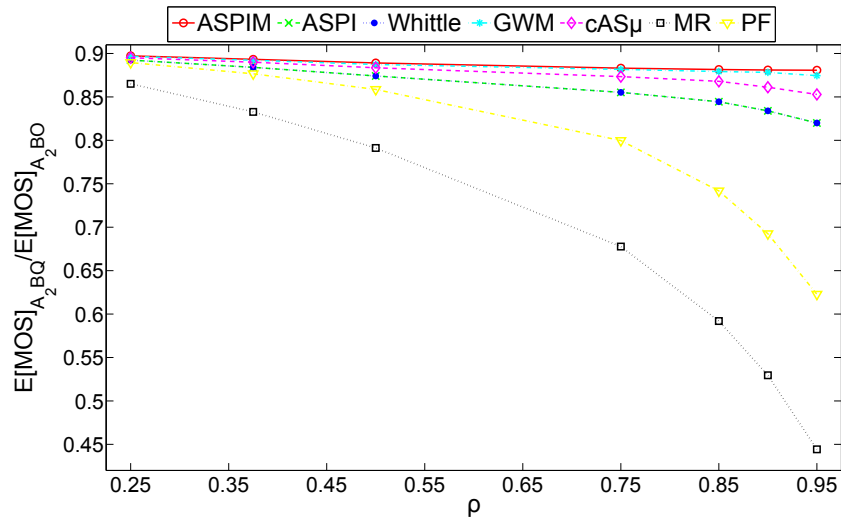
6.3.1.4 QoE drastikoaren kasuaren azterketa

Ondorengoan, QoE ezaugarriari dagokionez atzerapenarekiko tolerantzia oso baxua deneko kasua adierazten duen A_2BQ agertokia aztertzeari ekingo zaio. MOS funtzioa latza deneko konfigurazio horren errendimendu emaitzak 6.26 Irudian biltzen dira.



6.26 Irudia: Errendimendu metriken emaitzak A_2BQ agertokian.

Bataz besteko QoE-aren inguruan goi-ezkerreko grafikoa azaltzen da, zeinetan atzerapenaren hazkuntzarekin QoE-a drastikoki degradatzearen ondorioz bataz besteko MOS-en balioak jaisten direla agerikoa den. QoE-aware ez diren diziplinentzat jaitsiera nabarmena den arren, ASPIM-ek MOS-en balioak 4ren gainetik mantentzen ditu sare karga guztientzat. Gainera, ASPIM-ek beste QoE-aware politikarekiko duen hobekuntza nabariagoa da, bigarren horrek, zeinarentzat kanal egoera probabilitateak ezezagunak diren, antza denez, atzerapenarekiko degradazio bortitzak ezin ditu hain era efizientean kontrolatu. Dena den, 6.27 Irudian beha daitekeenez, kanal konstanteko atalean ondorioztatu den bezalaxe, bi **QoE-aware proposamenak MOS funtziora hoberen egokitzen diren diziplinak** dira.

6.27 Irudia: A_2BQ eta A_2BO agertokien arteko $\mathbb{E}[\text{MOS}]$ erkaketa.

Bestalde, goi-eskuineko grafikoan batz besteko atzerapena erakusten da, eta beha daitekeenez, QoE-aware-ak ez diren politikentzat oinarritzko agertokiaren pareko balioak lortzen dira, baina QoE-aware-en kasuan balio horiek are altuagoak dira. Horren arrazoia, atzerapen atalaseak oso gogorrak izanik, QoE-aware politiketik behin atzerapenaren goi atalasea gaindituta, erabiltzaile horiei lehentasun minimoa ematea da, horien atzerapenen balioak disparatzen direlarik.

Ekitateari dagokionez, MOS-aren zein atzerapenaren Jain indizeen balioak beheko grafikoetan ilustratzen dira. Batetik, ezkerreko grafikoan beha daitekeenez, nahiz eta MOS-aren fairness-a oro har txarragoa izan, ASPIM-ek ekitate maila egokia mantentzen du sare karga guztietan. Bestetik, atzerapenaren ekitatean (begiratu eskuineko grafikoa), QoE-aware-ak ez diren politiketan ez da desberdintasunik somatzen, baina bi QoE-aware diziplinek okerragotzea erakusten dute, haien artean antzeko emaitzak ematen dituztelarik.

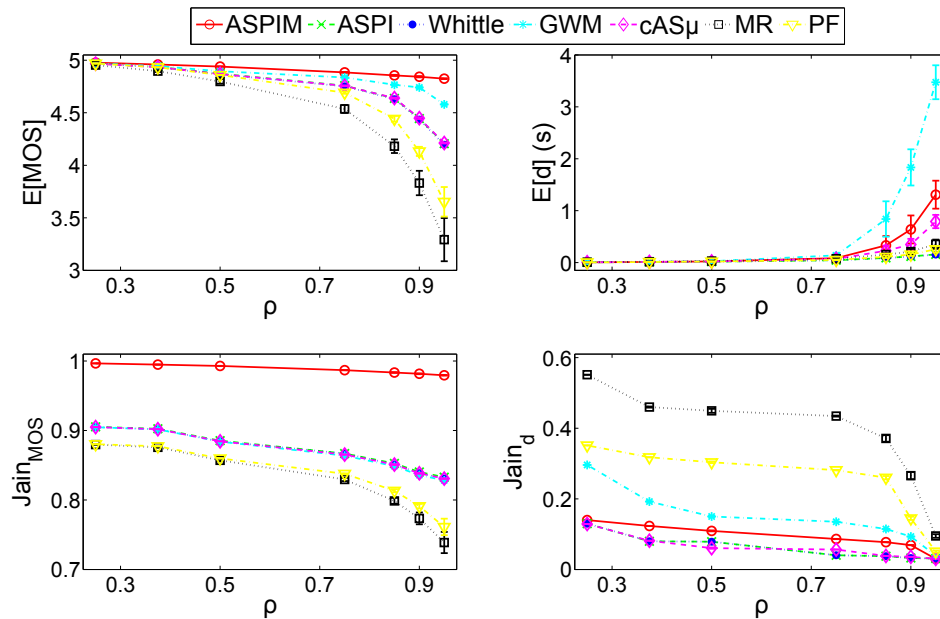
Beraz, laburbilduz, QoE-a drastikoa den kasu horretan, orokorrean orain arteko politiken onenetik txarrenerako ordena ematen da, diziplinen arteko aldeak nabariagoak izanik, eta QoE-aware politiken MOS(d) funtziorako egokitzapena azpimarratzekoa da.

6.3.1.5 Beste batz besteko tamainarako azterketa

Puntu honetan, aurreko konfigurazioekin alderatuta, batz besteko tamaina txikiagoa deneko A_2BTb agertokia ikasiko da.

Modu honetan, 6.28 Irudian beha daitekeenez, μ -ren errorea daramaten ASPIM eta ASPI diziplinek espero den portaera erakusten dute. Batetik, ASPI-ren eta Whittle-n emaitzak oso antzekoak izaten jarraitzen dute, batz besteko atzerapen txikiena emanez

(ikus goi-eskuineko grafikoa). Bestetik, batz besteko MOS-ean ASPIM irabazlea izaten segitzen du (begiratu goi-ezkerreko grafikoa), QoE-aren fairness-a bermatzen duelarik (behe-ezkerreko grafikoa). Orokorrean, konfigurazio honetan emaitza hobekoak lortzen dira metrika eta politika guztientzat, planifikazio estrategiak aurreko agertokien ordena berean ordenatzen direlarik onenetik txarrenera.



6.28 Irudia: Errendimendu metriken emaitzak A_2BTb agertokian.

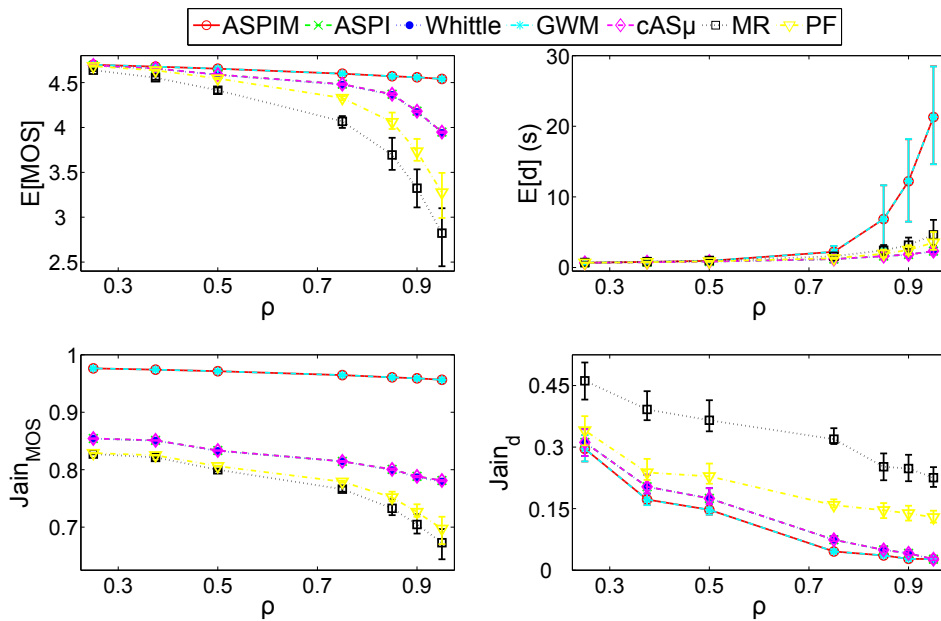
Beraz, batz besteko tamainaren txikiagotzeagatik hurbilketaren errorearen handitzearen menpekoak diren Whittle-n oinarritutako bi politikek errendimendu ona ematen dutela egiaztatzen da.

6.3.1.6 ON/OFF kasuaren azterketa

Bi kanaleko klase bakarreko simulazio txanda honekin bukatzeko, ON/OFF kanalen kasu berezia islatzen duen $A_2BOnOff$ agertokia ikasiko da. ON/OFF kasua etenaldiak dituen kanal kapazitate konstanteko kasu berezi bat bezala ikus daiteke, eta hasiera batean, eskuratutako zerbitzuaren menpekota den Gittins diziplinak emaitza onak eman ahal dituela badirudi ere, politika hori ezegonkorra dela ikusi da.

Bestalde, 6.29 Irudian bi kanaleko eredu berezi hori kontenplatzen duen $A_2BOnOff$ agertokirako aztergai diren planifikazio estrategien lau errendimendu metriken emaitzak biltzen dira. Ikus daitekeenez, metrika guztientzat, batetik, ASPIM eta GWM politikek, eta bestetik, Whittle, ASPI eta cASμ diziplinek, emaitza berdin-berdinak ematen dituzte haien artean, kanal eredu horrek scheduling erregela horien indizearen balioa

berdina izatea eragiten baitu. QoE-an osotasunean, batz bestekoan zein ekitatean, QoE-aware estrategiak aukerarik onenak dira (ezkerreko grafikoak). Bestalde, atzerapenaren batz bestekoan (goi-eskuineko grafikoan) aurreko hirukotea irabazlea da, QoE-aware diziplinek nabarmenki balio altuagoa dutelarik. Atzerapenaren fairness-ari dagokionez (behe-eskuineko grafikoan), hoberena MR da, PF-ek jarraitzen diolarik, QoE-aware diziplinak txarrenak izanik.



6.29 Irudia: Errendimendu metriken emaitzak $A_2BOnOff$ agertokian.

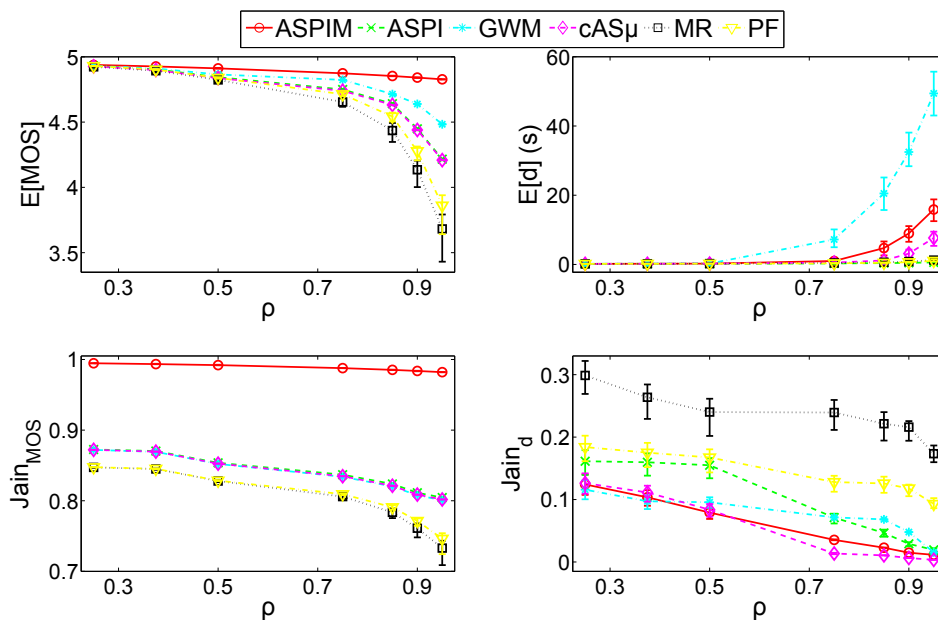
6.3.2 N kanalen kasurako analisia

Kanal aldakorrean planifikazio estrategien errendimenduaren analisiari amaiera emateko, sekzio honetan kanal egoera kopurua bi baino handiagoa denean N kanalerako baliagarriak diren proposatutako ASPIM eta ASPI diziplinek esperotako portaera dutela egiaztatuko da.

Hasteko, batetik, 6.3.2.1 puntuan, kanal probabilitateak kanal kapazitateen orden gorakorrekoak direnen A_5BOP konfigurazioa analizatuko da, eta bestetik, hurrengo azpi-atalean, 6.3.2.2, aurreko agertoki horren kanal probabilitateen alderantzizko ordena duen A_5BP agertokia aztertuko da.

6.3.2.1 Kanal probabilitateak kanal kapazitateen ordena gorakorrekoak direnen kasurako azterketa: kasu baikorra

Kasu baikorra deritzogun A_5BOP agertokiaren errendimendu metriken emaitzak 6.30 Irudian azaltzen dira. Irudi horretan agertzen diren grafikoen arabera, eskuratu nahi den xedea betetzen dela ikusten da, bost kanaleko konfigurazio horretarako, batz besteko MOS-ean ASPIM eta batz besteko atzerapenean ASPI irabazleak izanik. Horrez gain, ASPIM-ek QoE-aren fairness-a ere bermatzen du. Gainera, batz besteko MOS-ari dagokionez ASPIM eta beste QoE-aware politikaren arteko diferentzia handiagoa da.

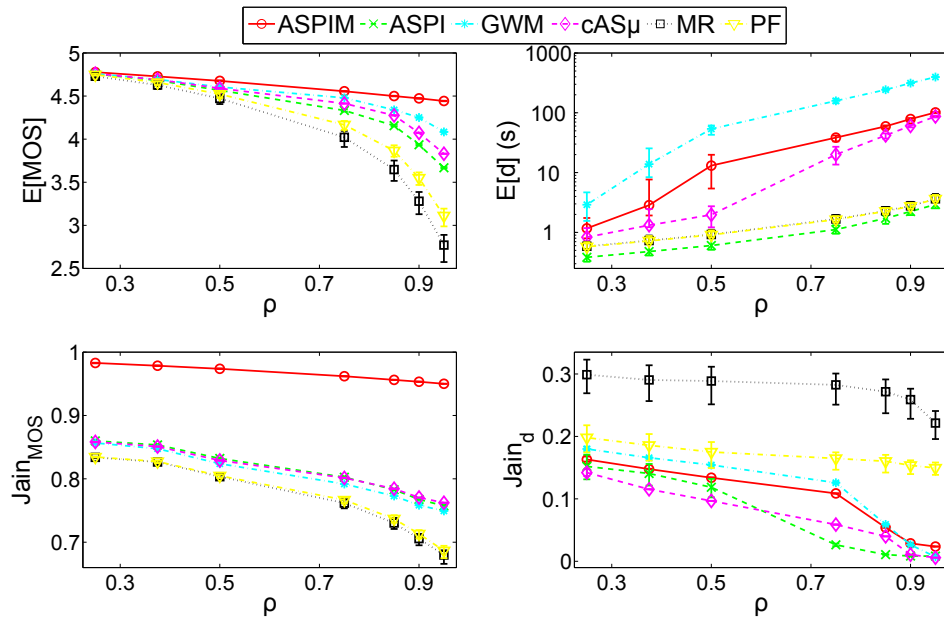


6.30 Irudia: Errendimendu metriken emaitzak A_5BOP agertokian.

6.3.2.2 Kanal probabilitateak kanal kapazitateen ordena behakorrekoak direnen kasurako azterketa: kasu ezkorra

Puntu honetan aztergai den kasu ezkorra deritzogun A_5BP agertoki horri dagozkion simulazioen emaitzak 6.31 Irudian laburbiltzen dira. Kasu baikorrarekiko QoE-an antzeko emaitzak lortzen dira, baina kasu ezkorrean zertxobait okerragoak dira, batz bestekoan batez ere. Hala ere, ASPIM-en batz besteko MOS-aren balio guztiak 4.5en gainetik daude, eta MOS-aren Jain indize guztiak 0.95en gainetik ere. Atzerapenean fairness-ean aurreko agertokiarekin alderatuta pareko metrikak eskuratzen badira ere, atzerapenean batz bestekoan, espero denez, orokorrean emaitzak nabarmenki txarragoak dira kanal konfigurazioa beraren ondorioz (goi-eskuineko grafikoa eskala logarit-

mikoan); ASPI-k batz besteko atzerapen baxuak mantentzen ditu. Edozein kasutan, metrika guztientzat (atzerapenaren fairness-ean diziplina txarrenen artean zenbait al-daketa egonik) onenetik txarrenerako politiken ordena mantentzen da.



6.31 Irudia: Errendimendu metriken emaitzak A_5BP agertokian.

6.4 Errendimenduaren analisia klase anitzeko inguruneetan

Klase bakarreko erabiltzaileak dauden kasuan, proposatutako indize erregelek errendimendu ona erakusten dutela egiaztatu da aurreko 6.2 eta 6.3 sekzioetan. Horrez gain, atal honetan erabiltzaile mota desberdinak dituzten agertokiak aztertuko dira, klase bakarraren kasurako ondorioztatutako scheduling proposamen horiek klase anitzeko testuinguruan baliagarriak direla baieztatzeko asmoz.

Horretarako, klase anitzeko inguruneetan scheduling estrategien errendimendua erkatuko da. Klase anitzeko agertoki bakoitzaren barruan politiken portaera modu globalean edo agregatuan analizatzeaz gain, klase bakoitzaren barruan portaera egokia dela eta klaseen artean fairness-a mantentzen dela aztertuko da. Batetik, klase anitzeko errendimendu globalerako aztergai diren lau metriken emaitzak analizatuko dira. Bestetik, errendimenduaren analisia klaseka eta klaseen arteko erkaketa batz besteko terminoetan egingo da soilik, proposatutako scheduling algoritmoen helburua testuinguru horretan ere betetzen dela egiaztatzeari garrantzia emanik (kanal konstantean, GWM-en balioztatzerako, batz besteko QoE-a bakarrik aztertuz). Y metrika bati dagokion bi klaseen arteko fairness-a adierazteko $Y_{z_1 z_2}$ metrika erabiliko da, zeina z_1 klasearen Y metrika horren balioaren eta z_2 klasearen Y metrika horren balioaren arteko zatidura den.

Modu honetan, lehendabizi, 6.4.1 atalean, kanal konstanteko klase anitzeko agertokiaren errendimenduaren azterketa egingo da. Ostean, kanal aldakorreko klase anitzeko errendimenduaren ikasketa burutuko da 6.4.2 sekzioan.

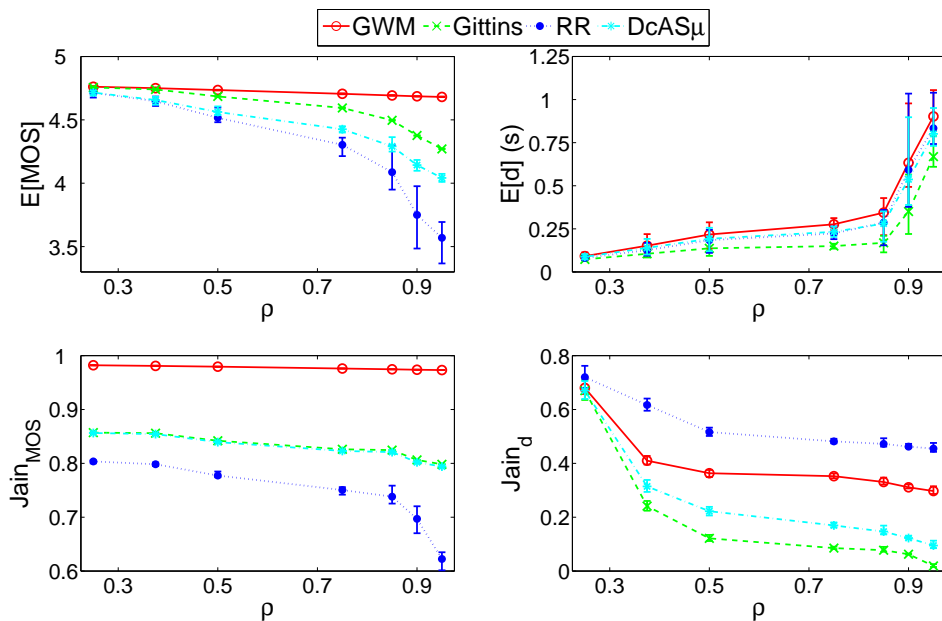
6.4.1 Kanal konstante kasurako azterketa

GWM planifikazio proposamenak erabiltzaile mota desberdinen presentzian errendimendu ona erakusten duela egiaztatze asmoz, atal honetan kanal konstanteko klase anitzeko hiru agertoki aztertuko dira. Hasteko, 6.4.1.1 puntuan, tamainaren banaketan ezberdinak diren bi klaseek osatutako KATb agertokia aztertuko da. Ondoren, hautemandako kalitateari dagokionez exijentzia ezberdinak dituzten bi klase kontsideratzen dituen KAQ agertokia ikasiko da 6.4.1.2 atalean. Kanal konstanteko klase anitzeko errendimenduaren azterketarekin amaitzeko, 6.4.1.3 puntuan, KAK agertokian haririk gabeko sare konfigurazioa analizatuko da, zeinak kanal kapazitate ezberdinak dituzten erabiltzaileak kontsideratzen dituen.

6.4.1.1 Tamainan desberdinak diren klaseen kasurako azterketa

Jarraian bataz besteko tamaina oso desberdina duten bi klaseek osatutako KATb konfigurazioan scheduling diziplinek duten errendimendua aztertuko da.

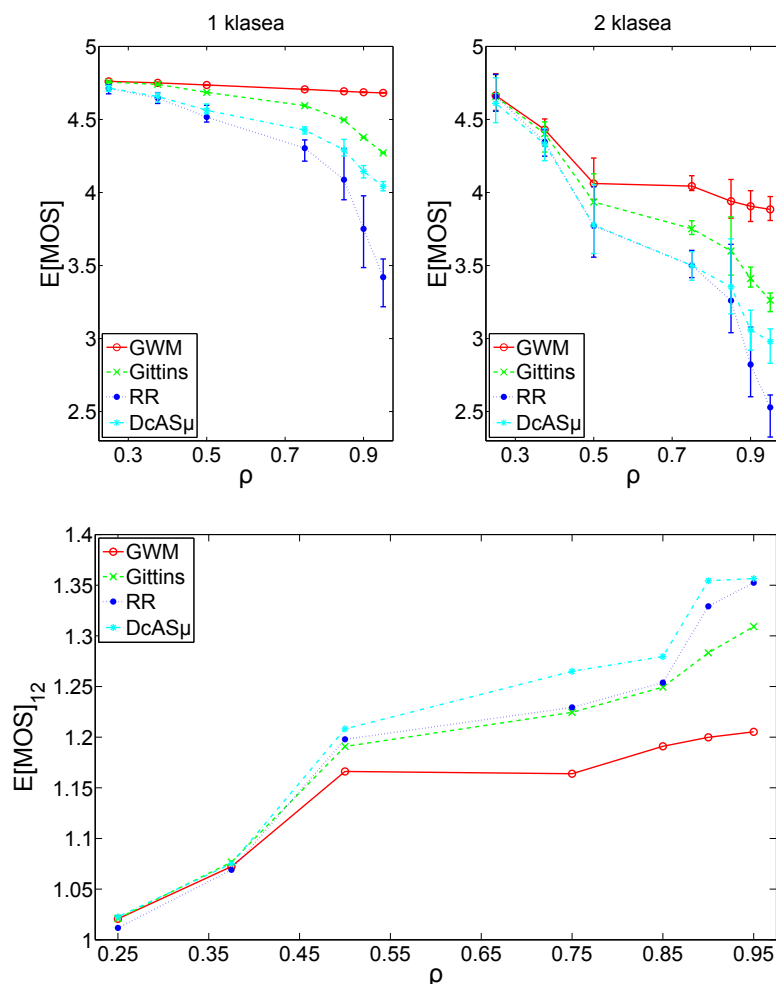
6.32 Irudian agertoki horren errendimendu globaleko emaitzak azaltzen dira. Kalitate subjektiboaren errendimenduari buruz klase bakarreko konfigurazioetan ematen den portaera bera lortzen dela esan genezake (begiratu ezkerreko grafikoak). Era honetan, GWM diziplinak gainontzeko politikak nabarmenki hobetzen ditu bai bataz besteko MOS-ean bai QoE-aren ekitatean, eta QoE-aware politika horrek lortutako emaitzak biziki onak dira; bataz besteko MOS-a 4.75 inguruan eta MOS-aren Jain indizea 0.98 balioaren inguruan mantentzen dira kontsideratutako sare karga guztientzat. Hala ere, goi-eskuineko grafikoan beha daitekeenez gure proposamenak bataz besteko atzerapen altuena ematen du; dena den, balio horiek RR-enak baino zertxobait altuagoak dira, eta gainera, lortutako balio horiek segundo bat baino txikiagoak dira. Bestalde, behe-eskuineko grafikoan atzerapenaren fairness-ari buruz erakusten denaren arabera, RR irabazlea bada ere, gure proposamenak Gittins eta DcAS μ argiro gainditzen ditu, %25 eta %20 inguruan hurrenez hurren ρ altuetan.



6.32 Irudia: Errendimendu metriken emaitza globalak KATb agertokian.

Bestaldetik, bataz besteko QoE-ari dagokion klase barruko portaera eta klaseen arteko konparaketa beha daitezke 6.33 Irudian. Batetik, goiko grafikoetan ikus daitezkeen bezala, bi klaseen barruan agregazioaren orden berean ordenatzen dira politikak, GWM onena izanik. Bestetik, bi klaseak erkatzerakoan, beheko grafikoaren arabera, GWM-

ek klaseen artean ekitate onena aurkezten du, sare karga baxuetan diziplina guztiek antzeko portaera aurkezten badute ere, gainontzeko sare kargetan GWM nabarmenki hoberena delarik.



6.33 Irudia: $\mathbb{E}[\text{MOS}]$ klaseka KATb agertokian.

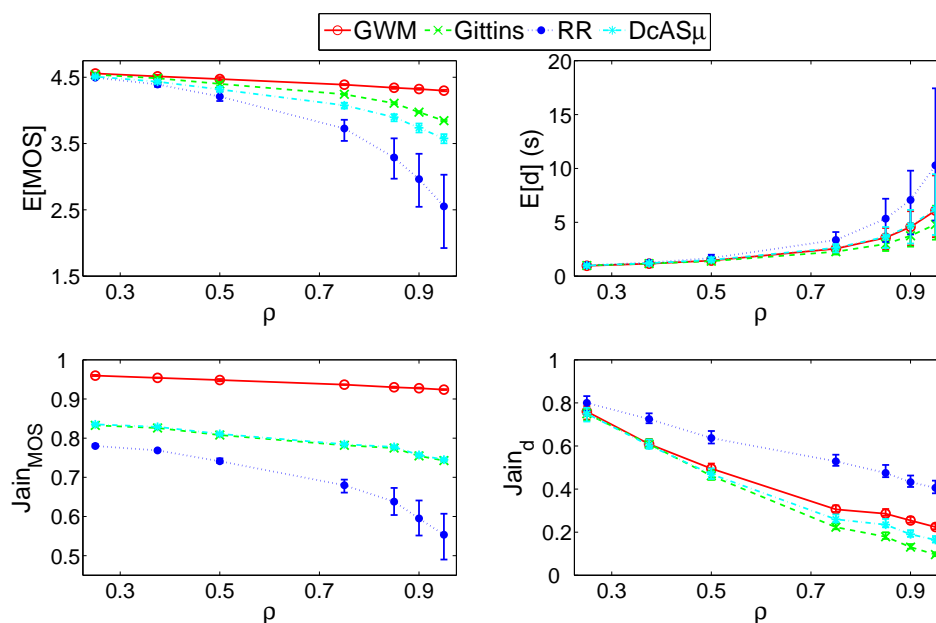
Beraz, klase bakarrerako proposatutako GWM diziplinak errendimendu egokia azaltzen du klaseak nahasterakoan zein klaseka ere.

6.4.1.2 Kalitatearen hautematean desberdinak diren klaseen kasurako azterketa

Puntu honetan QoE ezaugarrian bereizten diren bi erabiltzaile klase kontsideratzen dituen KAQ agertokia analizatuko da.

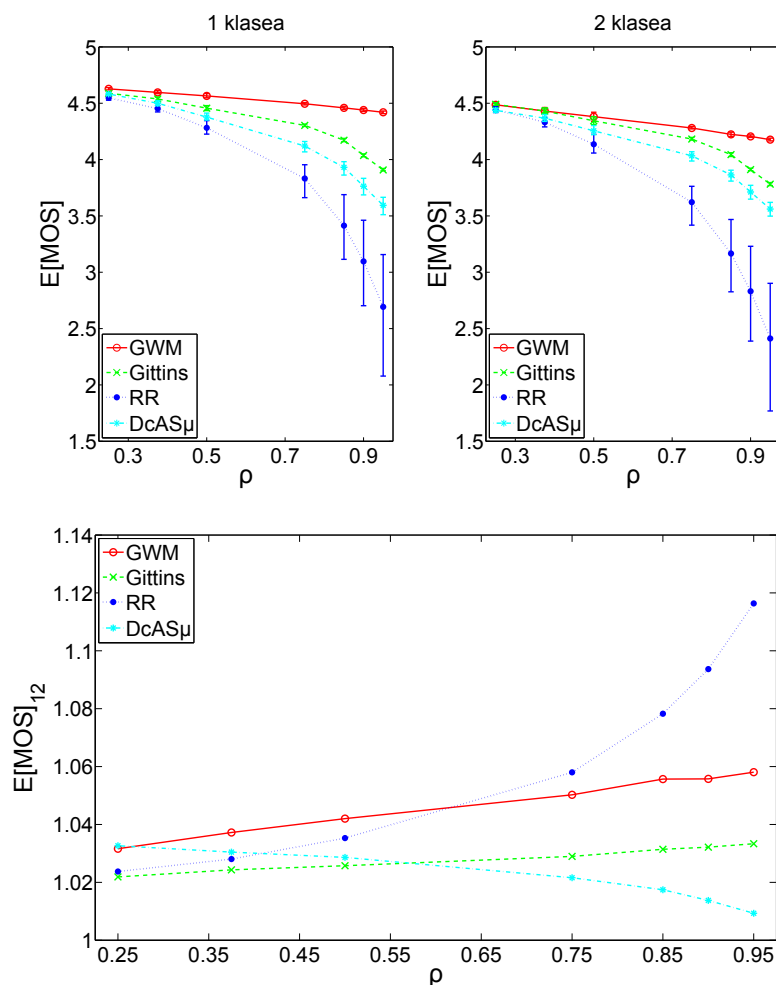
QoE-an barietatea duen agertoki horri dagozkion errendimendu metriken emaitza agregatuak 6.34 Irudian laburbiltzen dira. Goi-ezkerreko grafikoan erakusten denaren arabera, QoE-aware politikek kanal konstanteko oinarrizko agertokiko batz besteko

MOS balioak gutxi gorabehera mantentzen dituzten bitartean (ikus 6.6 Irudiko ezkerreko grafikoa), QoE-a kontuan hartzen ez duten diziplinen batz besteko MOS-a baxuagoa da agertoki honetan. Nahiz eta bigarren klaseko erabiltzaileek atzerapenarekiko tolerantzia baxuagoa izan, QoE-aware politikak guztirako batz besteko MOS-a ahalik eta altuen mantentzen saiatzen dira. Aurreko konfigurazioetan bezala, GWM politikak era arrakastatsuan lortzen du hori, baina DcAS μ -k ez. Hala ere, bi diziplina horien klase bakarreko eta klase anitzeko kasuak erkatuta lortutako batz besteko MOS-a antzekoa da. Bestetik, Gittins eta RR politikentzat bigarren klasearen atzerapenaren tolerantzia jaitsiera hori batz besteko MOS-aren beharapenean islatzen da. Bestalde, beste hiru errendimendu metrikeri dagokienez, planifikazio estrategiak onenetik txarrenera aurreko agertokiaren ordena berean ordenatzen dira (aurrekoen salbuespenak salbuespen), metriken arteko aldeak parekoak izanik.



6.34 Irudia: Errendimendu metriken emaitza globalak KAQ agertokian.

Batz besteko MOS-aren klasekako portaerari erreferentzia eginez, 6.35 Irudiko goiko grafikoen beha daitekeenez, klase bakoitzaren barruan dena koherentea da agregazioaren ordenarekin alderatuta. Gainera, klaseen artean GWM diziplina justuena ez bada ere, ekitate maila egokiak mantentzen ditu (begiratu 6.35 Irudiko beheko grafikoa).



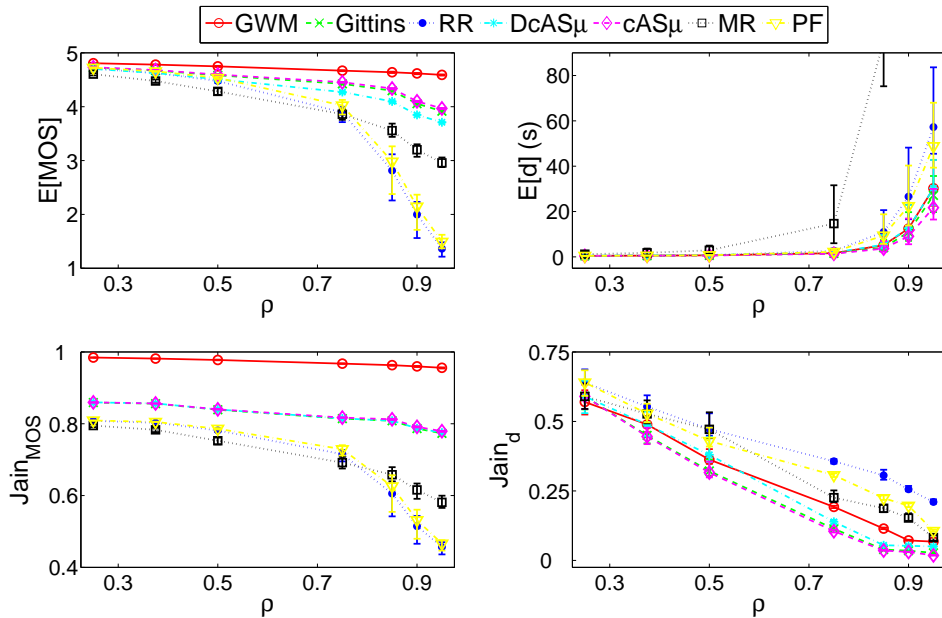
6.35 Irudia: $\mathbb{E}[\text{MOS}]$ klaseka KAQ agertokian.

6.4.1.3 Kanal kapazitatean desberdinak diren klaseen kasurako azterketa: Wireless sare baterako aplikazioa

Kanal konstanteko lehenengo zazpi agertokietan ondorioztatzen denaren arabera, erabiltzaile guztiek kanal kapazitate bera duten sare batean gure GWM indize erregelak ondo funtzionatzen duen heuristika da, zeinak batz besteko MOS-ean zein QoE-aren ekitatean gainontzeko politikak gainditzen dituen. Honetaz gain, atal honetan, kanal kapazitatean bereizten diren klaseak kontenplatzen dituen wireless sare konfigurazioan, KAK agertokia, gure QoE-aware proposamenaren errendimendua aztertu eta konparatuko da.

KAK agertokiari dagozkion errendimenduaren agregazioaren emaitzak 6.36 Irudian biltzen dira. Beha daitekeenez, lehenagoko agertokietan kontsideratutako lau diziplinnek aurreko konfigurazioen tendentzia bera jarraitzen dute. Azpimarratzekoa da kanal

kapazitate homogeenan bezala, QoE-aren errendimendu terminoetan GWM aukerarik onena dela.



6.36 Irudia: Errendimendu metriken emaitza globalak KAK agertokian.

Bataz besteko MOS-ari dagokionez (6.36 Irudiko goi-ezkerrean), cAS μ -k eta Gittins-ek GWM-eri jarraitzen diote, QoE-a kontuan hartzen ez duten bi horiek antzeko portaera erakusten dutelarik. Aipatzekoa da ere degradazioan oinarritutako bi politiken artean, cAS μ DcAS μ baino hobea dela. Atzerapenak eragindako kostuaren degradazioan oinarritutako estrategia QoE-aren degradazioan oinarritutakoa baino hobea izatea bixia da, eta hortaz, agerian uzten du berriro DcAS μ erabiltzeak ez duela hobekuntzarik ekartzen. Bestetik, bataz besteko MOS balio baxuenak RR-ek eta PF-ek ematen dituzte, bi horiek antzeko portaera dutelarik, PF pixka bat hobea izanik. Azkenengo bi politika horiek ρ baxuetan MR gainditzen badute ere, ρ altuetan horien errendimendua nabarmenki jaisten da.

Bestalde, 6.36 Irudiko behe-ezkerreko grafikoan adierazten denaren arabera, cAS μ -ren, DcAS μ -ren eta Gittins-en MOS-aren Jain indizeen balioak oso antzekoak dira. Bestetik, PF-ek RR-en pareko emaitzak ematen ditu, horrekiko hobekuntza txikia erakutsiz. ρ baxuetan MR aukerarik txarrena bada ere, gainontzeko sare kargetarako PF-en eta RR-en gaintetik mantentzen da.

Bataz besteko atzerapenen grafikoan azaltzen denez (6.36 Irudiko goi-eskuinekoa), kanal kapazitate ezberdinen kasuan Gittins ez da optimoa, cAS μ -k balio baxuagoak erakusten dituelarik. Gure GWM proposamenaren emaitzak Gittins baino pixka bat altuagoak dira, DcAS μ -renaren oso antzekoak. PF bere aldetik aipatutakoen gaintetik

mantentzen da, RR-ek jarraitzen diolarik balio zertxobait altuagoekin. Ezbairik gabe, bataz besteko atzerapenarekiko emaitza txarrenak ematen dituen politika MR da, ρ altuetan horren balioa izugarri igotzen delarik, eta hau probabilitate altua duten CQI baxuetako erabiltzaileak diskriminatzearen ondorioz da.

Atzerapenaren fairness-ari dagokionez (ikus 6.36 Irudiko behe-eskuineko grafikoa), RR irabazlea da, PF-ek segitzen diolarik. MR-ek gure politika gainditzen badu ere, oraingoan ere $DcAS_\mu$ gure proposamenaren atzetik mantentzen da. Bestalde, Gittins-en antzera cAS_μ ez da justua atzerapenarekiko, fluxu handiak zigortzen baititu (eta honekin batera, CQI baxua badute are gehiago).

Bestaldetik, 6.37 Irudian klasekako errendimenduari erreferentzia egiten dioten batz besteko kalitate subjektiboaren emaitzak laburbiltzen dira. Goiko grafikoetan, probabilitate nabaria duen CQI baxueneko klasearen emaitzak adierazten dira ezkerrean eta CQI altueneko klasearenak eskuinean. Bi kasuetan GWM irabazlea da, klase txarrenean ere bataz besteko MOS-a 4ren gainetik mantentzen delarik. Aipatzekoa da ere MR-en kasuan $CQI = 2$ denerako MOS minimora heltzen diren MOS-ak eskuratzen direla, eta klase onenean bigarren aukerarik egokiena dela. Beraz, klase bakoitzaren barruan politiken ordena aldatuz doa, baina GWM beti hobereena da. Agregazioan bezala, PF eta RR emaitza txarrak ematen dituzte klaseka. Horrez gain, beheko grafikoan hirugarren klasetik ($CQI = 2$) hamabostgarren klasera klase onenarekiko emaitza normalizatuak aurkezten dira, zeinetan GWM-ek 1en inguruko balioak emanik klaseen artean fairness maila egokiak mantentzen dituela ondorioztatzen den.

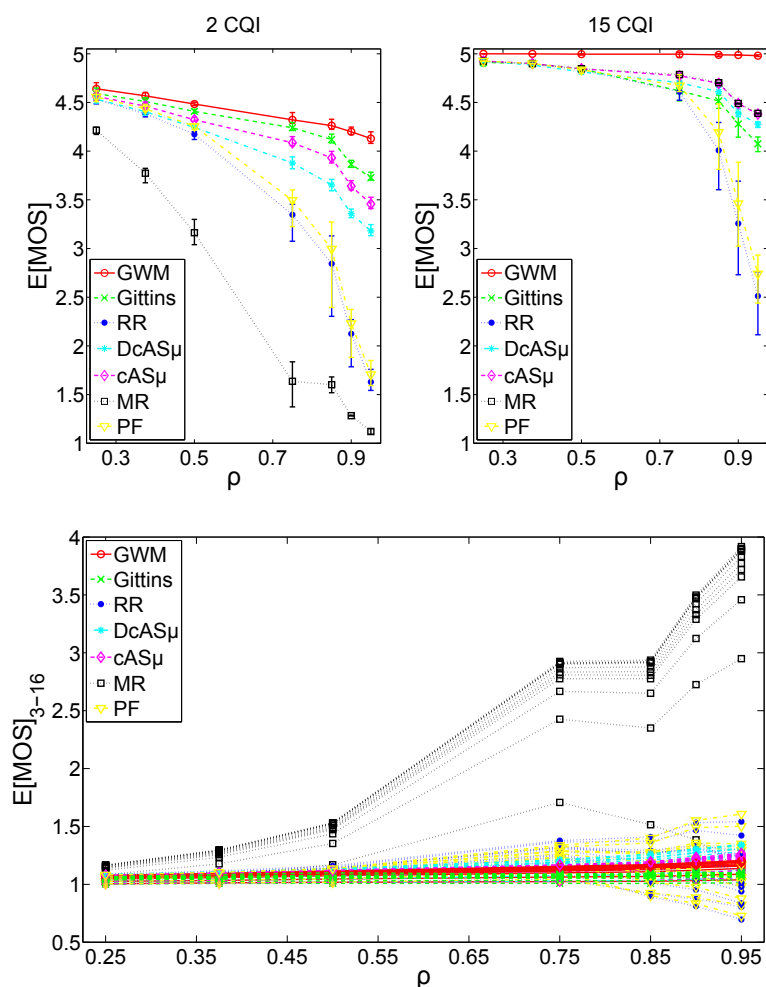
Beraz, atal honetan lortutako emaitzek proposatutako GWM diziplinaren errendimendua erabiltzaile estatikoak dituen wireless sare agertokietan ere egokia dela egiaztatzen dute.

6.4.2 Kanal aldakor kasurako azterketa

Klase bakarreko kanal aldakorreko konfigurazioetan kanal aldakorrerako proposatutako scheduling algoritmoek esperotako portaera erakusten dutela ondorioztatu da. Horrez gainera, sekzio honen helburua mota ezberdineko erabiltzaileak daudenean indize erregela proposamen horien errendimendua egokia dela egiaztatzea da. Horretarako, klase anitzeko bi kanaleko lau agertoki ikasiko dira 6.4.2.1 puntuan, eta ondoren, N kanaleko beste bi 6.4.2.2 atalean.

6.4.2.1 Bi kanalen kasurako azterketa

Bi kanaleko klase anitzeko azterketarekin hasteko, kanal probabilitatean desberdintzen diren bi klase dituen A_2AKq agertokia aztertuko da 6.4.2.1.1 puntuan. Ondoren, A_2AKr

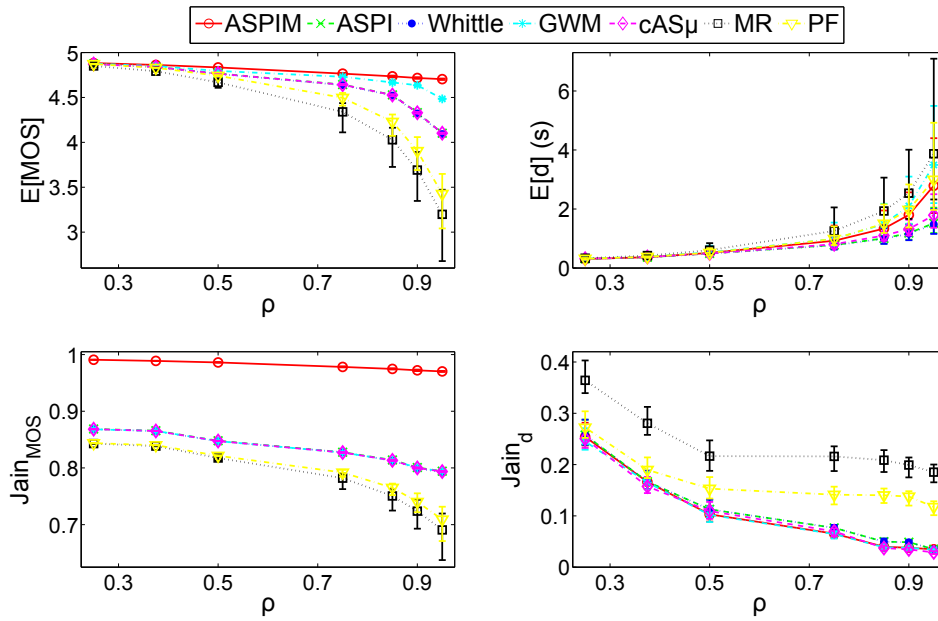
6.37 Irudia: $\mathbb{E}[\text{MOS}]$ klaseka KAK agertokian.

agertokian, kanal kapazitate ezberdineko bi klaseen kasua analizatuko da 6.4.2.1.2 azpiatalean. Hurrengo sekzioak, 6.4.2.1.3, A_2AQc agertokia du aztergai, zeinetan QoE-an eta kostean desberdintzen diren bi klaseentzako errendimendu analisia egingo den. Bukatzeko, atal honetako azken puntuan, 6.4.2.1.4, bi tamaina klase kontsideratzen dituen A_2ATb agertokia landuko da.

Bestalde, aipatzekoa da konfigurazio berri horietan klase bakarreko agertokietan baino transmisio tasa altuagoak erabiltzen direla (aurkezpen orden gorakorrean: 28.56 Mbps, 37.8 Mbps, 25.2 Mbps eta 25.2 Mbps), eta hori dela eta, oro har, kasuan kasu, klase anitzekoetan errendimendu metriken balio hobekak lortzea espero da.

6.4.2.1.1 Kanal probabilitateetan desberdinak diren klaseen kasurako azterketa

q_2 -ren balioan desberdintzen diren klaseen nahasketa den A_2AKq agertokiaren inguruko simulazioen emaitza globalak 6.38 Irudian aurkezten dira.



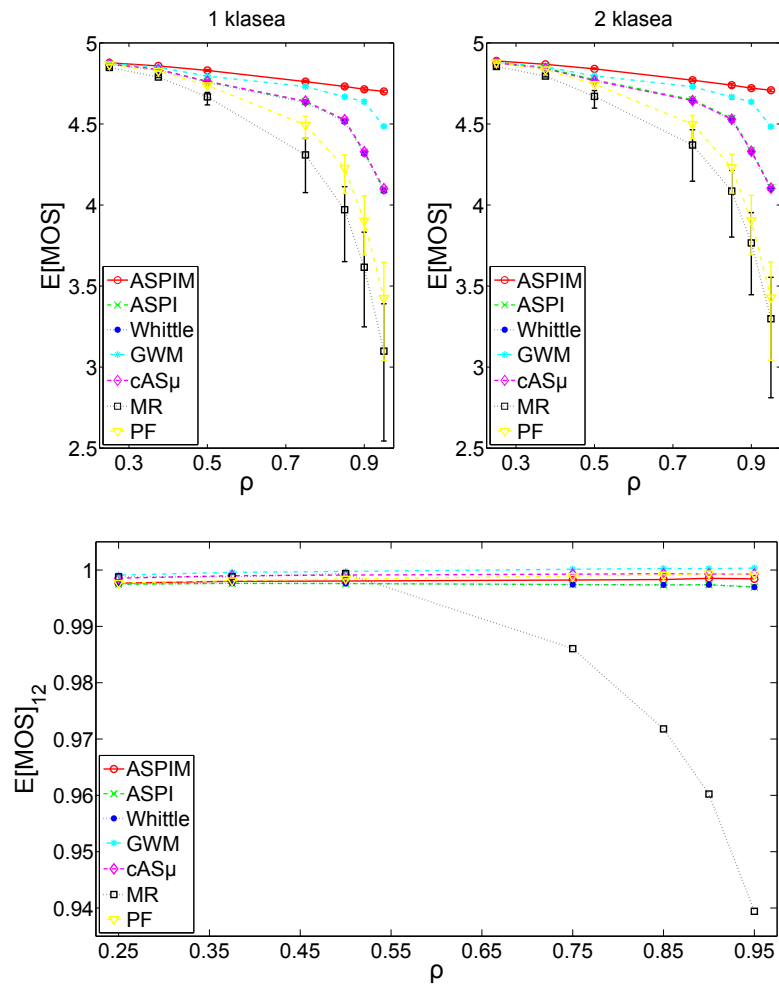
6.38 Irudia: Errendimendu metriken emaitza globalak A_2AKq agertokian.

Ezkerreko grafikoetan adierazten denaren arabera, QoE-ari erreferentzia eginez, ASPIM nabarmenki hobereena da aspektu guztietan, MOS maximoaren inguruko batz bestekoak zein bat inguruko MOS-aren Jain indizeak erakutsiz. Gainera, QoE metrika bakoitzaren barruan planifikazio estrategiak aurreko klase bakarrek agertokiaren ordena berean ordenatzen dira onenetik txarrenera. Bestalde, atzerapenari buruzko eskuineko grafikoetan beha daitekeenez, atzerapenerako Whittle-n oinarritutako politikak batz besteko atzerapena minimizatzen jarraitzen dute, baina ekitatean bi horiek txarrenetarikoa dira. Bestetik, atzerapenaren fairness-ean MR, eta jarraian PF, aukerarik onenak badira ere, batz bestekoan bi QoE-aware politikak baino emaitza txarragoak erakusten dituzte.

Bestaldetik, batz besteko QoE-aren errendimendua klaseka aztertzen bada, 6.39 Irudian ikusten denaren arabera, klase bakarrek zein agertoki honen agregazioko portaera lortzen da. Modu honetan, klase bakoitzaren barruan orain arteko diziplinen ordena eskuratzen da, eta politika guztientzat bi klaseen emaitzak oso antzekoak dira, MR salbuespena izanik.

Era berean, batz besteko atzerapenari dagokion klasekako errendimendua analizatuz (ikus 6.40 Irudia), oraingoan ere klase bakoitzaren barruan Whittle-n oinarritutako

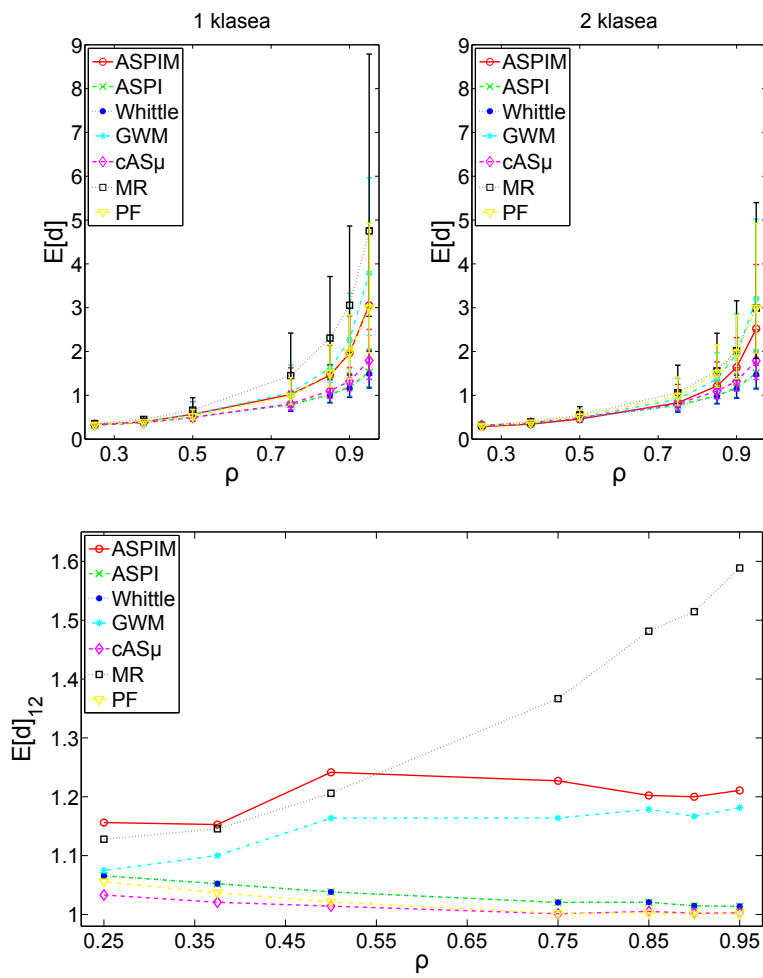
6.4. ERRENDIMENDUAREN ANALISIA KLASE ANITZEKO INGURUNEETAN 131



6.39 Irudia: $\mathbb{E}[MOS]$ klaseka A_2AKq agertokian.

atzerapenaren minimizaziorako politikak aukerarik onenak dira. Gainera, bi klaseak erkatzerakoan, bi diziplina horiekin ekitate maila egokiak lortzen direla esan genezake.

Beraz, klase anitzeko testuinguru honetan bai ASPIM-ek bai atzerapenaren minimizaziorako Whittle diziplinek emaitza onargarriak aurkezten jarraitzen dute.

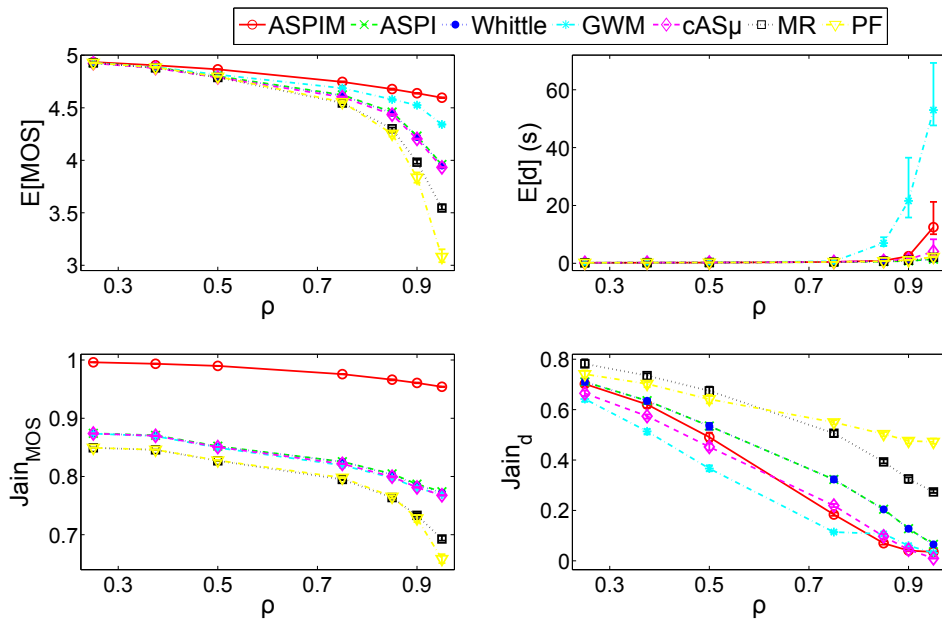


6.40 Irudia: $\mathbb{E}[d]$ klaseka A_2AKq agertokian.

6.4.2.1.2 Kanal kapazitateetan desberdinak diren klaseen kasurako azterketa

Jarraian transmisio abiaduran desberdintzen diren self-similar motako bi klase kontsideratzen dituen A_2AKr agertokiaren errendimenduaren analisia egiteari ekingo zaio.

Agertoki horri dagozkion agregazioaren errendimenduaren emaitzak 6.41 Irudian jasotzen dira. Goi-ezkerreko grafikoa aztertuz, kanal konstantean ondorioztatu den bezala, konfigurazio ez self-similarrean orokorrean batz besteko MOS balio baxuagoak erdiesten direla behatzen da, sare kargaren menpekotasuna gehiago nabarmentzen delarik ASPIM-entzat ere. Hala ere, ASPIM QoE-aren bai batz bestekoan bai fairness-ean aukera onena da. Dena den, atzerapenaren batz bestekoan (goi-eskuineko grafikoa), QoE-aware politikek nabarmenki txarrenak izaten segitzen dute, Whittle-ASPI bikotea gainontzeko diziplinen artean batz besteko atzerapenaren minimizazioa bermatzen dutelarik.

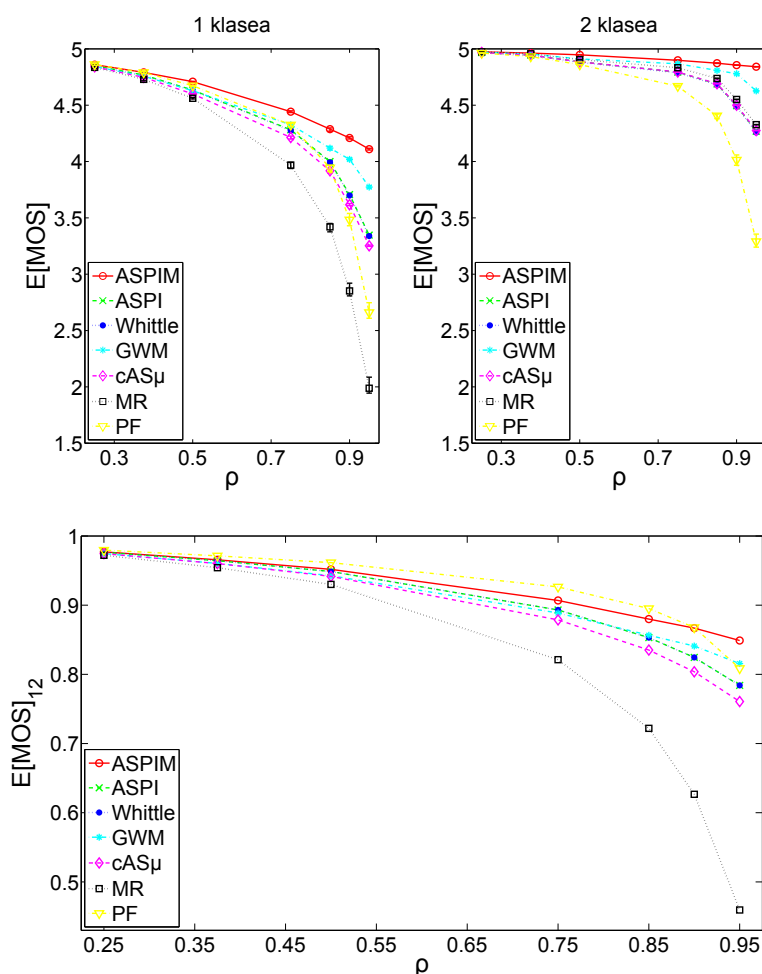


6.41 Irudia: Errendimendu metriken emaitza globalak A_2AKr agertokian.

Bestalde, ekitateari dagokionez (beheko grafikoean), QoE-aren zein atzerapenaren fairness-ean transmisio abiadurak handiagoak izateak Jain indizeen balio altuagoak eragin ditu, kanal konfigurazio berri horren ondoriozko fairness-aren hobekuntza hori atzerapenaren ekitatean nabariagoa izanik. QoE-aren fairness-ean orain arteko politiken onenetik txarrenerako ordena mantentzen bada ere, atzerapenean, ρ altuetan PF-k MR gainditzen du, eta bi politika horiek kenduta atzerapenerako Whittle-n oinarritutako diziplinek gainontzekoak hobetzen dituzte.

Horretaz gain, batz besteko QoE-aren klasekako balioztatzerako emaitzak

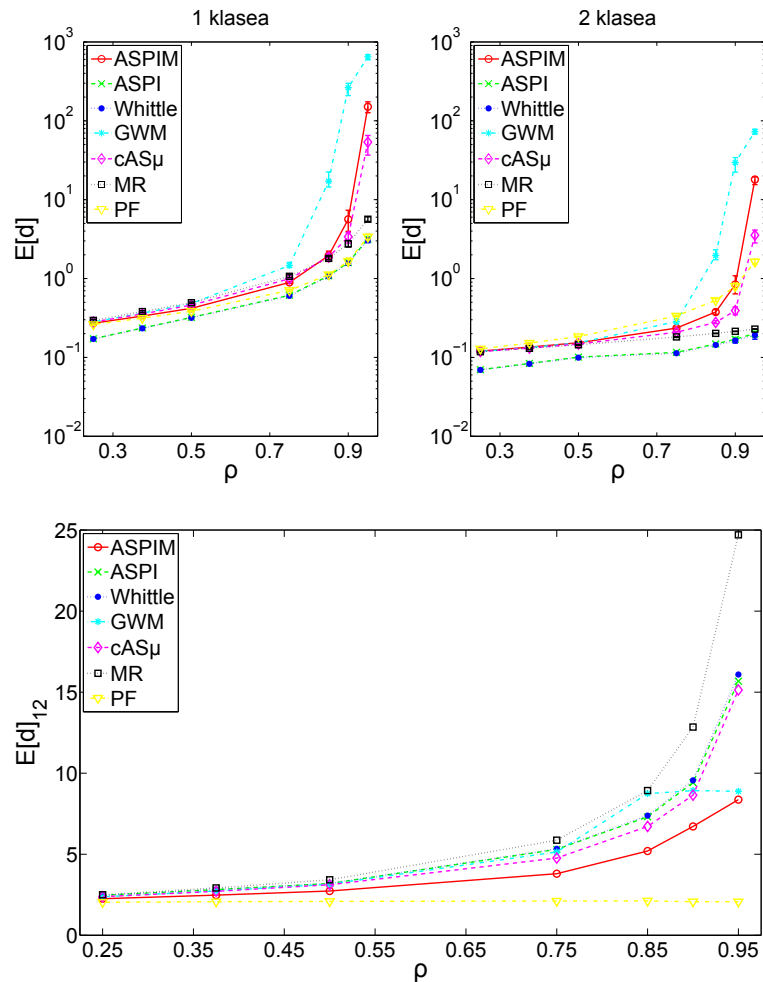
6.42 Irudian azaltzen dira. Klaseen arteko aldea nabarmena izanik, klasearen barruan QoE-aware politikak aukerarik onenak izaten jarraitzen dutela azpimarratzekoa da, ASPIM irabazlea delarik. Gainera, bi klaseak konparatzen baditugu, hauen arteko ekitatea hobeto mantentzen duen politika ASPIM da; diziplina horrek oro har PF-k baino konparaketa ratio pixka bat baxuagoa ematen badu ere, sare karga altuenarentzat justuena da. Bestetik, MR-en txarragotzea lehenengo klasean oso nabaria dela aipatzekoa da.



6.42 Irudia: $\mathbb{E}[\text{MOS}]$ klaseka $A_2\text{AKr}$ agertokian.

Bestaldetik, batz besteko atzerapenaren klasekako portaera aztertzen badugu (begiratu 6.43 Irudiari), klase barruan atzerapenerako Whittle-n oinarritutako diziplinak aukerarik onenak badira ere, klaseen arteko fairness-ari dagokionez hori ez da betetzen. Horrela, klaseen arteko ekitatea hoberen mantentzen duen politika PF da. Hala ere, horren arrazoa klase onenean PF-ren atzerapenak nahiko altuak direla da. Gainera, ohartu bi klaseetan PF-ren atzerapenaren emaitzak Whittle-nak eta ASPI-renak

baino txarragoak direla, eta hortaz, nahiz eta azkeneko bi diziplina horientzat klaseen arteko aldea handiagoa izan, errendimenduaren ikuspuntutik bi klaseentzako emaitza baxuagoak eskuratzea aproposagoa izan daiteke.

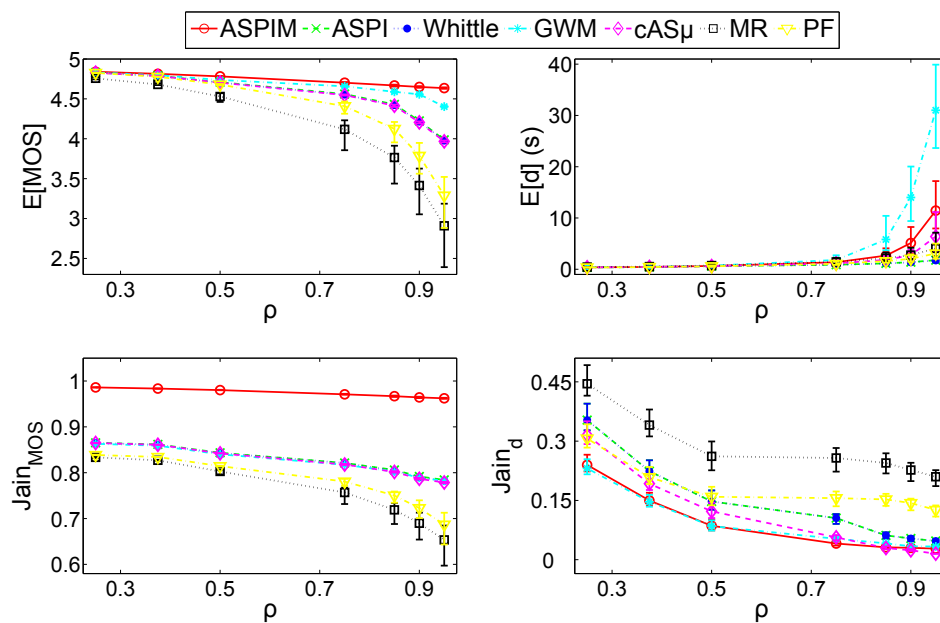


6.43 Irudia: $E[d]$ klaseka A_2AKr agertokian.

6.4.2.1.3 Kalitatearen hautematean eta kostuan desberdinak diren klaseen kasurako azterketa

Ondorengoan, QoE ezaugarrian eta kostuan bereizten diren bi klaseen kasua analizatu da, A_2AQc agertokia hain zuzen ere.

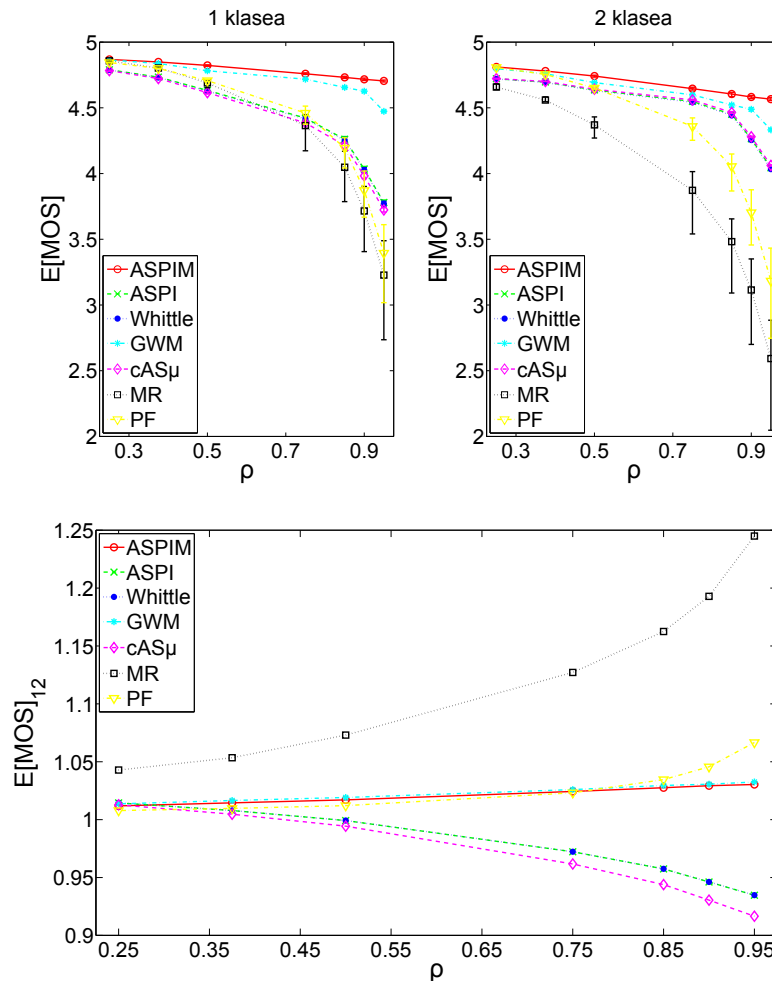
Agertoki horretarako aurkeztutako simulazio emaitza globalen arabera (6.44 Irudian), orain arte landutakoan azaltzen den tendentzia berbera lortzen da. Modu honetan, konfigurazio horretan errendimendu metrika guztietarako espero den politiken arteko ordena mantentzen da.



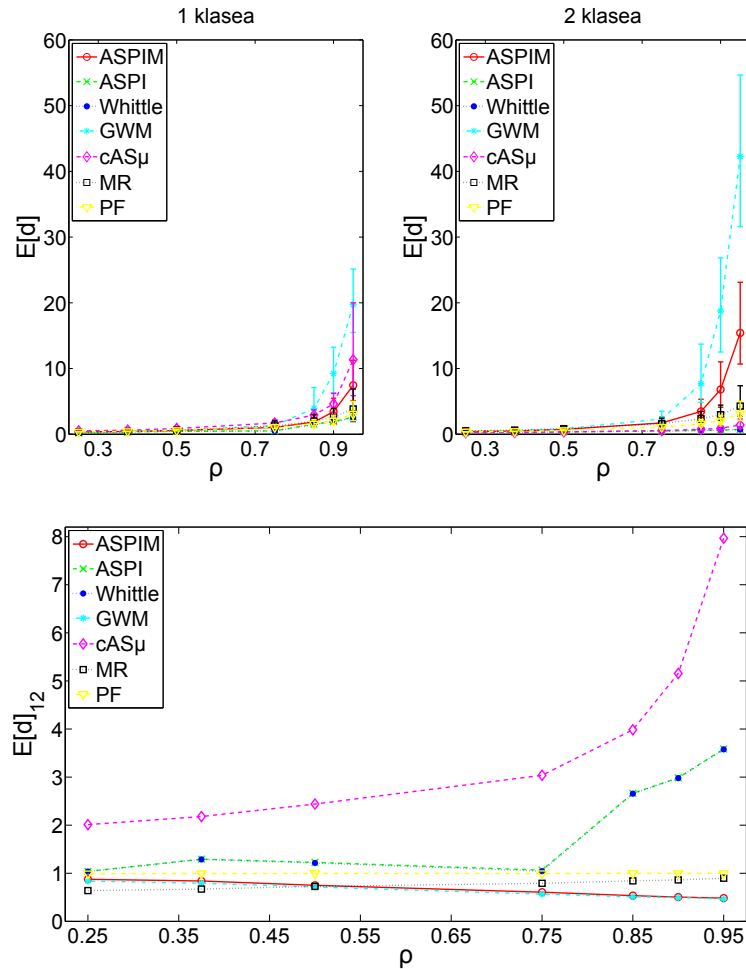
6.44 Irudia: Errendimendu metriken emaitza globalak A_2AQc agertokian.

Bestalde, klasekako errendimenduaren azterketarako emaitzak 6.45 eta 6.46 Irudietan azaltzen dira. Irudi horietan beha daitekeenez bi metrikentzat klaseen barruko portaera arrunta da; salbuespen bezala, lehenengo klasean batz besteko atzerapenean ASPIM $cAS\mu$ baino hobea da. QoE-aware politiken inguruan QoE-an desberdintzen diren kanal konstanteko klase anitzeko konfigurazioaren tendentzia bera azaltzen da; hau da, atzerapenean goi-atalase baxuena duen klasea txarragoa da bai QoE-an bai atzerapenean. Gainera, QoE-aware politikek klaseen arteko fairness egokiena aurkezten dute batz besteko MOS-ari dagokionez. Bestetik, QoE-aware ez diren politiken artean kostearen menpekoak direnetan (Whittle, ASPI eta $cAS\mu$) koste altuena duen klaseak emaitza hobekoak eskuratzen ditu. PF-ek eta MR-ek, berriz, antzeko emaitzak erakusten dituzte bi klasetan. Modu honetan, kosteen bidez bigarren klaseari lehentasuna emateak atzerapenari dagokionez kostean oinarritutako diziplinetan kla-

seen artean desberdintasun handiagoa egotea eragiten du, baina Whittle-k zein ASPI-k klase bakoitzaren barruan atzerapen baxuena erakutsiz.



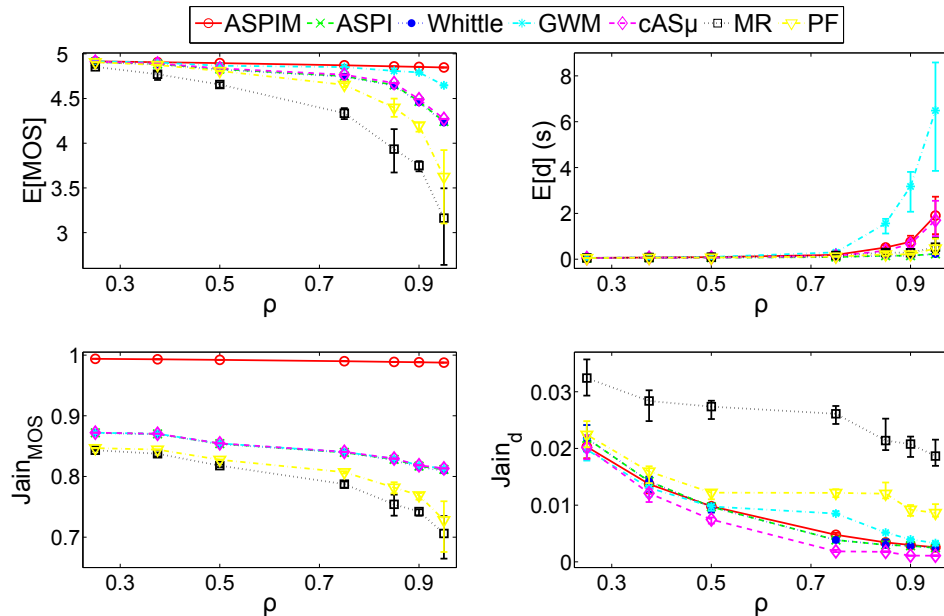
6.45 Irudia: $\mathbb{E}[MOS]$ klaseka A_2AQc agertokian.

6.46 Irudia: $\mathbb{E}[d]$ klaseka A_2AQc agertokian.

6.4.2.1.4 Tamainan desberdinak diren klaseen kasurako azterketa

Bi kanaleko klase anitzeko errendimendu azterketarekin bukatzeko, batz besteko tamainan ezberdinak diren bi klaseen arteko nahasketa adierazten duen A_2ATb agertokia analizatuko da.

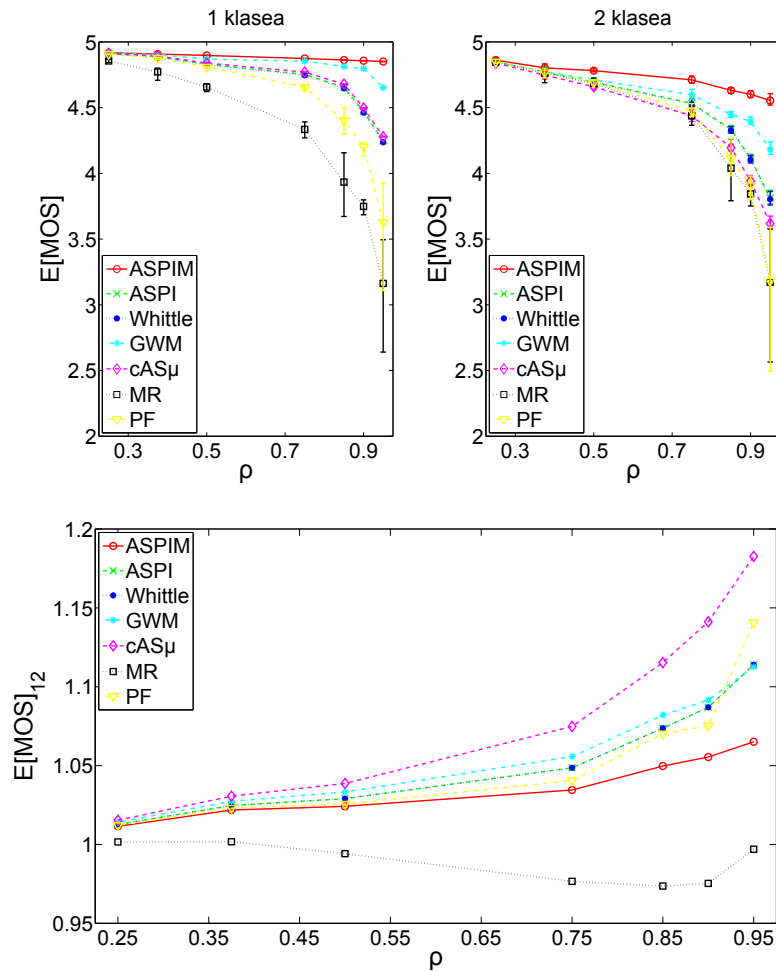
6.47 Irudian ikus daitekeenez, tamaina anitzeko agertoki horren agregazioan orain arte lortutako planifikazio estrategien onenetik txarreneko ordena eskuratzen da, ASPIM QoE-aren maximizatorako, eta Whittle eta ASPI batz besteko atzerapenaren minimizatorako aukerarik onenak izanik. Bestalde, aipatzekoa da, horrelako kanal aldakorreko batz besteko tamaina ezberdineko konfigurazioan, diziplina guztiek oso errendimendu txarra erakusten dutela atzerapenaren ekitatean, sare karga guztietarako atzerapenaren Jain indizeen balioak 0.1 baino txikiagoak direlarik.



6.47 Irudia: Errendimendu metriken emaitza globalak A_2ATb agertokian.

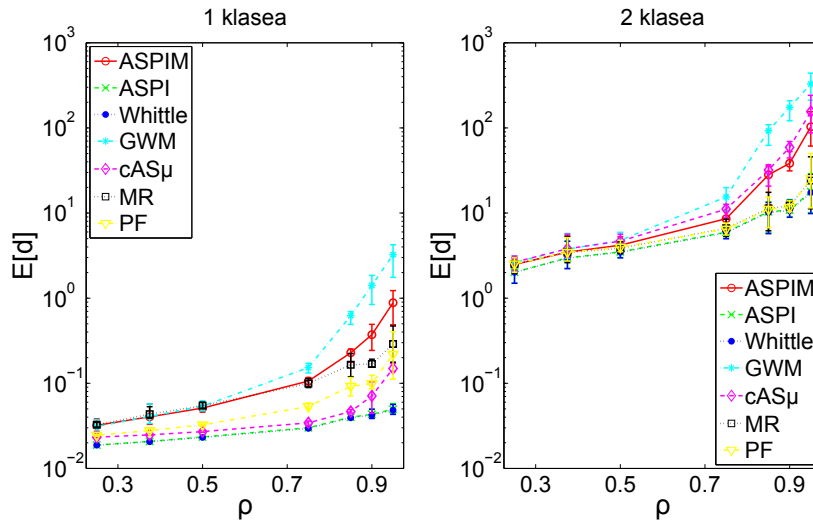
Bestaldetik, kalitate subjektiboari dagokion klasekako portaera analizatzen bada 6.48 Irudian, QoE ezaugarria klase bakoitzeko batz besteko tamainara egokituta izanik, klaseen barruan diziplinen orden tradizionala lortzen da, ASPIM aukera onena delarik. Horrez gain, QoE-aware politika horrek klaseen artean fairness-a mantentzen du.

Horretaz aparte, 6.49 Irudiaren arabera, batz besteko tamainan alde nahiko altua dagoen agertoki horretarako normala denez, bigarren klasearen batz besteko atzerapenak askoz altuagoak dira. Halere, bi klaseetan Whittle-n oinarritutako atzerapenaren minimizaziorako proposatutako diziplinek balio baxuenak ematen dituzte.

6.48 Irudia: $\mathbb{E}[\text{MOS}]$ klaseka $A_2\text{ATb}$ agertokian.

6.4.2.2 N kanalen kasurako azterketa

Planifikazio estrategien errendimenduaren analisiari amaiera emateko, klase anitzeko N kanaleko bi konfigurazio aztertuko dira. Lehendabizi, klase bakarreko sare kasu baikorra eta ezkorra konbinatzen dituen $A_5\text{AKq}$ agertokia landuko da 6.4.2.2.1 azpi-atalean. Bukatzeko, benetako LTE wireless sare bateko konfigurazioa adierazten duen $A_{16}\text{ALTE}$ agertokia analizatuko da 6.4.2.2.2 azpi-sekzioan.

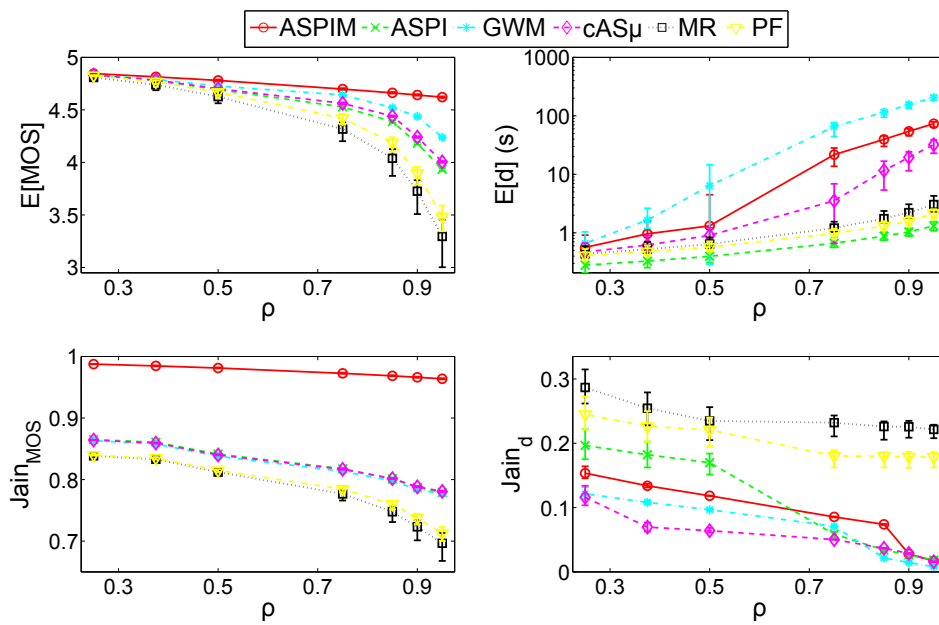
6.49 Irudia: $\mathbb{E}[d]$ klaseka A_2ATb agertokian.

6.4.2.2.1 Kanal probabilitateetan ezberdinak diren klaseen kasurako azterketa: kasu baikorra eta ezkorren arteko nahasketa

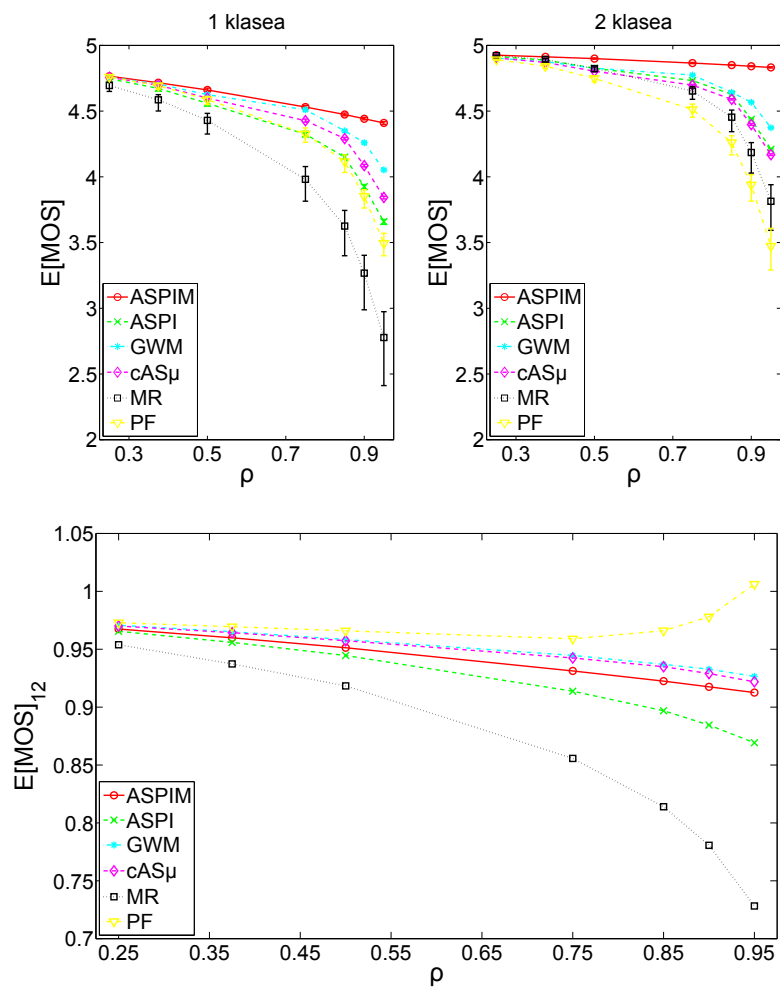
Oraingoa aurreko bi klase bakarreko kasu baikor eta kasu ezkor konfigurazioen nahasketa den A_5AKq agertokia analizatuko da. 6.50 Irudian ilustratzen diren grafikoaren arabera, konfigurazio hori bi agertoki horien nahasketa izatearen ondorioz, eskuratutako errendimendu metrika guztien balioek aurreko bi agertoki arteko bitarteko balio bat ematen dutela egiaztatzen da. Era honetan, aurkezten den bost kanaleko klase anitzeko agertoki horretan, ASPIM-ek QoE-an erabat eta ASPI-k batz besteko atzerapenean irabazle izaten jarraitzen dute.

Bestaldetik, batz besteko QoE-ari dagozkion klasekako emaitzak 6.51 Irudian aurkezten dira. Goiko grafikoaren arabera klaseen barruan ohizko politiken ordena mantentzen dela ikus daiteke, QoE-aware diziplinek, ASPIM-ek batez ere, emaitza hobeto eskuratzen dituztelarik. Gainera, planifikazio estrategia horrek klaseen arteko ekitate maila egokia lortzen du.

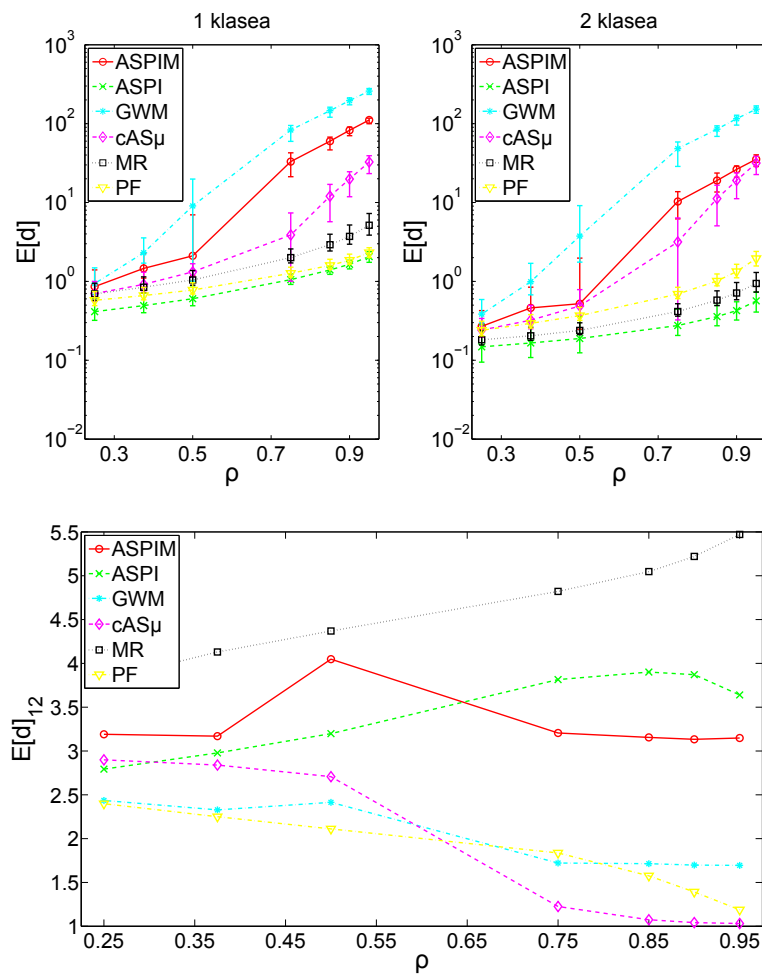
Era berean, batz besteko atzerapenean klasekako portaera aztertzen bada (ikus 6.52 Irudia), ASPI klaseen artean justuena ez bada ere, politika horrek klase baikoitzaren barruan atzerapen baxuenak eskuratzen ditu.



6.50 Irudia: Errendimendu metriken emaitza globalak A_5AKq agertokian.



6.51 Irudia: $\mathbb{E}[\text{MOS}]$ klasea A_5AKq agertokian.

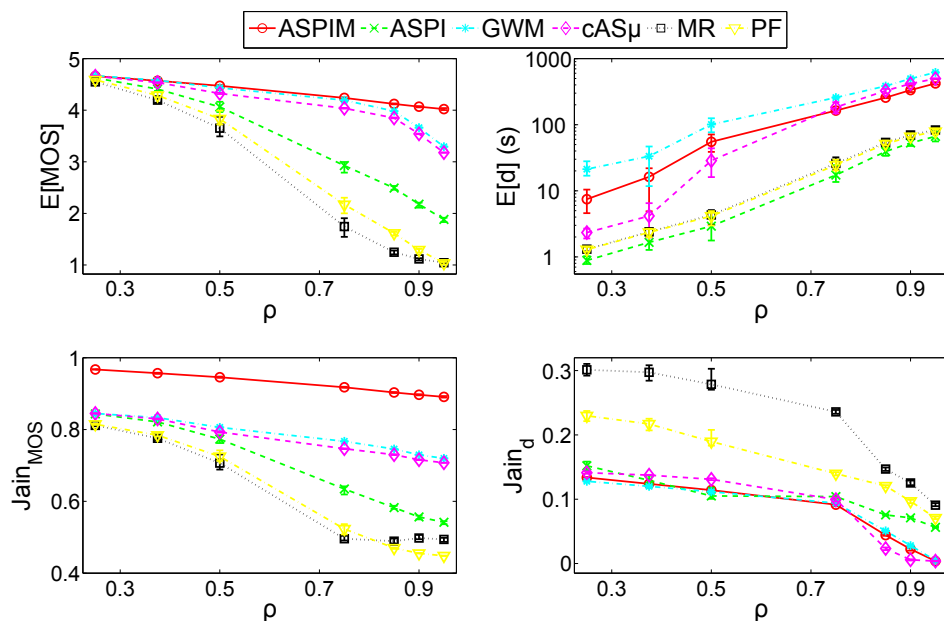


6.52 Irudia: $\mathbb{E}[d]$ klaseka A_5AKq agertokian.

6.4.2.2.2 Wireless sare erreal baterako azterketa: kanal korrelatuaren kasua

Errendimenduaren azterketarekin bukatzeko, kanal korrelazioa existitzen den eta transmisio tasak multiploak ez direnen hamasei kanal egoera dituen benetako LTE wireless sare bateko kasua islatzen duen A_{16} ALTE agertokia analizatuko da.

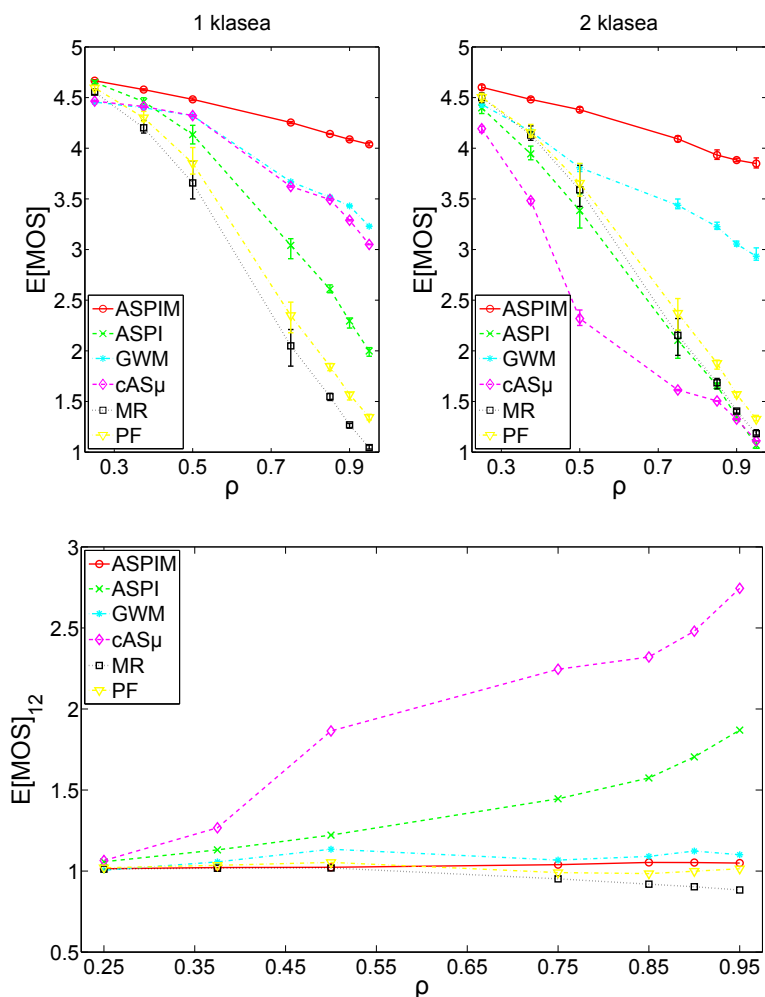
A_{16} ALTE agertokiari dagozkion errendimendu emaitza globalak 6.53 Irudian bilzen dira. Ikus daitekeenez, planifikazio estrategiek lehenagoko konfigurazioetako pareko tendentzia jarraitzen dute. Bataz besteko QoE-ari dagokionez, nabarmentzekoa da ASPIM-en eta GWM-en arteko aldea handiagoa dela, bereziki ρ altuentzat. Gainera, sare karga altuenarentzat ere ASPIM-ek lortutako balioak kalitatearen atalasearen ($MOS = 4$) gainera mantentzen dira. Horrez gain, konfigurazio berri honetan, MR-en, PF-en eta ASPI-ren bataz besteko MOS-ak biziki jaisten dira aurreko agertokiekin alderatuta. Era berean, QoE-aren fairness-ean, aurreko hiru politika horiek nabarmenki okerragotzen dira, ASPIM-ek ekitate maila egokiak lortzen dituelarik (MOS-aren Jain indizearen balioak 0.9ren gainera). Bestaldetik, kanal egoera onenetan egoteko probabilitate baxuak dituen sare kasu ezkor horren islapena diziplina guztientzat ematen den bataz besteko atzerapenaren hazkundera da, zeinetan balio txikiak ASPI-k erakusten dituen.



6.53 Irudia: Errendimendu metrikaren emaitza globalak A_{16} ALTE agertokian.

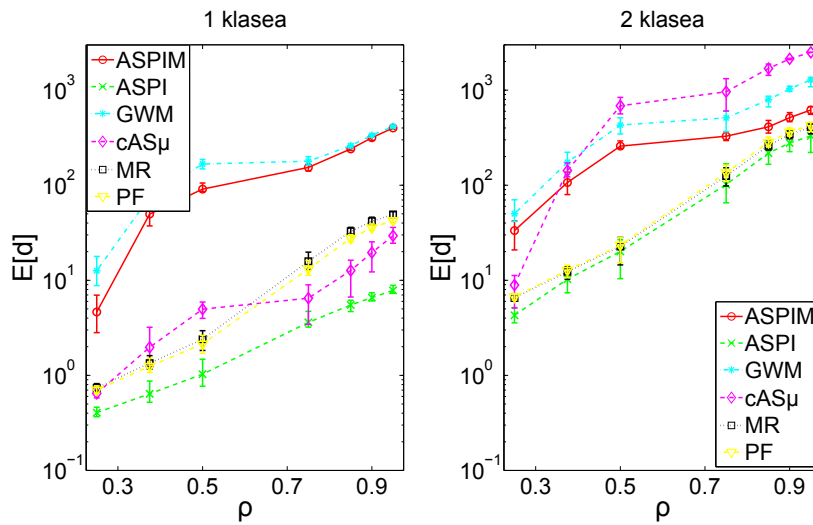
Bestalde, bataz besteko QoE-ari dagokion klase barruko portaera eta klaseen arteko erkaketa 6.54 Irudian azaltzen dira. Batetik, QoE-aware-ak diren politikentzat klaseen arteko fairness-a mantentzen da, ASPIM-ek 1en inguruko konparaketa ratioak ematen

dituelarik sare karga guztientzat, klase barruan aukerarik onena izanik. Bestetik, kostearen menpekoak diren politikentzat, ostera, koste txikiagoa eta batz besteko tamaina altuagoa duen bigarren klasearen txarragotzea nabariagoa da.



6.54 Irudia: $\mathbb{E}[\text{MOS}]$ klaseka A_{16} ALTE agertokian.

Horrekin batera, batz besteko atzerapenaren inguruko klasekako emaitzak 6.55 Irudian aurkezten dira. Bigarren klasearen batz besteko tamaina altua eta koste baxuagoa izatea klase horretarako lortutako atzerapen altuetan islatzen da. Dena den, klase barruko portaerari dagokionez, ASPI-k batz besteko atzerapen txikiena eskuratu du bi klaseetarako.



6.55 Irudia: $\mathbb{E}[d]$ klaseka A_{16} ALTE agertokian.

Beraz, kanal korrelazioa ematen den eta multiploak ez diren transmisio tasak dituen klase anitzeko sare konfigurazioan ere, kanal independenterako eta multiploak diren kanal abiadurentzat klase bakarrerako proposatutako ASPIM eta ASPI indize erregelen funtzionamendua egokia da.

6.5 Ondorioak

Kapitulu honetan, tesian zehar proposatutako GWM, ASPIM, ASPI eta Whittle indize erregelen balioztatzea egin da. Horretarako, scheduling estrategia berri horien errendimendua literaturan ezagunak diren diziplinek dutenarekin alderatu da esanguratsuak diren klase bakarreko zein klase anitzeko sare agertoki desberdinetan.

Modu honetan, 6.2 sekzioan aztertutakoaren arabera, kanal konstanterako proposatutako GWM scheduling algoritmo berritzailea barietate ugari eta adierazgarriak diren kanal konstanteko agertokietan baliagarria dela egiaztatzen da. Simulazio emaitzek gure proposamenak kontsideratutako scheduling estrategia aipagarrien QoE errendimendua hobetzen duela adierazten dute. Gure QoE-aware diziplinak gainontzeko politikak gainditzen ditu ez soilik MOS-aren batz bestekoan, baizik eta QoE-aren ekitatean ere. Hori lortzeko, QoE-aware politika hori fluxuen transmisioa beheko atzerapenaren atalasea baino lehen bukatzen saiatzen da, zeina atzerapenaren menpekota den QoE utilitate funtziora egokitzen den, MOS funtzio latzaren kasura ere.

Gainera, 6.4 atalean ikusi den bezala, mota desberdineko erabiltzaile klaseak daudenean ere funtzionamendu egokia erakusten du, erabiltzaile estatikoak dituen wireless sare baten kasua barne. GWM klase anitzeko batz besteko QoE metrikaren agregazioan aukerarik onena izateaz gain, kalitate subjektiboari dagokionez klase bakoitzaren barruan ere hobereena da eta klaseen artean fairness-a mantentzen du.

Aipatzekoa da ere, kanal konstanterako proposamenak batz besteko atzerapenaren minimizazioa lortzen duten politikak atzerapenaren fairness-ean gainditzen dituela. Horretaz aparte, QoE-aren degradazioan oinarritutako $DcAS\mu$ diziplinaren errendimendua desagokia dela ikusi da.

Hortaz, QoE-aware planifikazio politika berri hori sare hornitzaileek euren bezeroei satisfakzio maila egokiak bermatzeko erabilgarria izango da kanal kapazitatea konstantea denean.

Bestalde, kanal aldakorrerako QoE-aware planifikazio proposamenari erreferentzia eginez, kanal aldakorreko errendimenduaren azterketa ataletik (6.3 sekzioan) ateratako ondorioen arabera, Whittle-n oinarritutako metodologian kontsideratutako hurbilketen erroreak nabariak direnean eta kanala korrelatua izanik transmisio tasak multiploak ez diren kasurako ere, QoE-aren ikuspuntutik ASPIM-ek gainontzeko politikak gainditzen ditu bai batz bestekoan bai fairness-ean, batz besteko MOS-en zein MOS-aren Jain indizeen balio altuak ematen dituelarik. Horrez gain, klase anitzeko testuinguruan (6.4 atalean) portaera egokia erakusten du ere, bai modu globalean bai klaseka. Kanal konstanterako GWM-rekin gertatzen den antzera, fluxuen transmisioa d_{\min} aurretik amaitzen ahalegintzen da ASPIM, eta $MOS(d)$ funtziorako egokitzapena ere erakusten

	ASPIM	GWM
Indizearen adierazpena eta erregela	Kanal onenean $\widehat{\text{MOS}}(d+1)$ nulurik ez duen i egotekotan: $\max\{\mu_{(a,N)_i} \cdot \widehat{\text{MOS}}_i(d+1)\};$ bestela: $\max\left\{\frac{\mu_{(a,n)_i} \cdot \widehat{\text{MOS}}_i(d+1)}{\sum_{m>n} q_{m_i}(\mu_{(a,m)_i} - \mu_{(a,n)_i})}\right\}$	$\max\{\mu_{(a,n)_i} \cdot \widehat{\text{MOS}}_i(d+1)\}$
QoE-aren bataz bestekoa	Gainontzeko politikak gainditu $\mathbb{E}[\text{MOS}] > 4$ beti	ASPIM izan ezik, gainontzeko politikak gainditu $\mathbb{E}[\text{MOS}]_{\text{ASPIM}} - \mathbb{E}[\text{MOS}]_{\text{GWM}} < 0.5$ beti, (salbuespena A_{16} ALTE agertokia $\mathbb{E}[\text{MOS}]_{\text{ASPIM}} - \mathbb{E}[\text{MOS}]_{\text{GWM}} \approx 1$)
QoE-aren ekitatea	Gainontzeko politikak gainditu $J_{\text{MOS}} > 0.9$ beti	$0.15 < J_{\text{MOS}_{\text{ASPIM}}} - J_{\text{MOS}_{\text{GWM}}} < 0.25$ $J_{\text{MOS}_{\text{GWM}}} \approx J_{\text{MOS}_{\text{CAS}\mu}} \approx J_{\text{MOS}_{\text{Whittle,ASPI}}}$ $J_{\text{MOS}_{\text{GWM}}} \gg J_{\text{MOS}_{\text{PF,MR}}}$
Abantailak	QoE-aren bataz bestekoan zein fairness-ean onena	<ul style="list-style-type: none"> • Indize erregela baldintzaturik ez • Indizean batukaririk ez • $t_{e_{\text{GWM}}} \approx \frac{t_{e_{\text{ASPIM}}}}{N}$ • Kanal ereduaren beharrik ez
Desabantailak	Konplexutasuna: <ul style="list-style-type: none"> • Indize erregelari baldintzatua • Indizean: $\sum_{m>n}$ • $t_{e_{\text{ASPIM}}} \approx N \cdot t_{e_{\text{GWM}}}$ • Kanal ereduaren beharra (q_m) 	<ul style="list-style-type: none"> • $\mathbb{E}[\text{MOS}]_{\text{GWM}} < \mathbb{E}[\text{MOS}]_{\text{ASPIM}}$ • $J_{\text{MOS}_{\text{GWM}}} < J_{\text{MOS}_{\text{ASPIM}}}$

6.10 Taula: ASPIM eta GWM diziplinen konparaketa taula.

du.

Dena den, nahiz eta kanal aldakorreko testuinguruan ASPIM kanal konstanterako proposatutako GWM QoE-aware diziplina baino hobea izan QoE-aren bataz bestekoan zein ekitatean, QoE-aren hobekuntza horrek ere beste QoE-aware diziplinarekiko bere desabantailak ditu, eta orduan, kasuaren arabera bata edo bestea erabiltzea komenigarriagoa izango da. Modu honetan, QoE-aware indize erregela horien ezaugarri nagusiak, horien abantaila eta desabantaila batera, 6.10 Taulan laburbiltzen dira.

Egindako errendimenduaren azterketaren arabera, bataz besteko QoE-ari dagokionez, ASPIM izan ezik, GWM-ek gainontzeko diziplina guztiak gainditzen ditu. Gainera, ASPIM-en eta GWM-en arteko aldea kasurik txarrean 0.5 baino txikiagoa da, wireless sare errealeko kasua adierazten duen A_{16} ALTE agertokia salbuespena izanda,

zeinetan bi politiken arteko diferentzia 1 ingurukoa den. QoE-aren ekitateari erreferentzia eginez, bi diziplinen Jain indizeen arteko diferentzia kasurik txarrenean 0.15 eta 0.25 tartean erortzen da. Horretaz aparte, GWM-ek $cAS\mu$ -ren, Whittle-n eta ASPI-ren MOS-aren Jain indizeen antzeko emaitzak ematen ditu, azkeneko bi horiek zenbait kasutan gainditzen dituelarik, PF eta MR beti nabarmenki irabaziz. Beraz, GWM QoE-an bigarren aukerarik onena dela esan daiteke, eta antza denez, bi QoE-aware politiken QoE metriken aldea ikusita, atzerapenaren menpekota den MOS funtzio horren eragina batz besteko MOS-ean oso altua da, ASPIM-en izendatzailean azaltzen diren kanal egoera probabilitateek baino pisu gehiago duelarik.

Aitzitik, ASPIM indize erregela GWM indize erregela baino konplexuagoa da, GWM-en inplementazioa errazagoa zein exekuzio denbora azkarragoa direlarik. Batetik, GWM indize erregela berehalakoa da, hau da, ASPIM-en ez bezala, indizeen kalkulurako ez da erregelaren kanal egoera onenerako baldintzarik egiaztatzen. Simulazioetan behatzen denaren arabera, t_e exekuzio denborari dagokionez GWM ASPIM baino N aldiz arinagoa da gutxi gorabehera. Bestetik, GWM-en kasuan indize bakoitzaren kanal kondizioaren menpekota den $m > n$ goi limitetzat duen batukaririk ez da erabiltzen. Horrez gain, indizearen kalkulurako kanal egoera probabilitateak behar izateak aldeztatik kanala modelaturik egotea eskatzen du. Hortaz, lortu nahi den QoE-aren maximizazioaren zehaztasunaren eta indize erregelaren konplexutasunaren arteko konpromisoa bilatuko da ASPIM edo GWM aukeratzekoan.

Bestaldetik, kanal aldakorrean batz besteko atzerapenaren minimizaziorako proposatutako scheduling estrategiari dagokionez, horien errendimenduaren inguruan 6.3 atalean ondorioztatutakoaren arabera, Whittle-n metodologian sinplifikazioen errore nabarmenen menpe eta transmisio tasak multiploak ez direnen kanal korrelatuaren kasuan ere, batz besteko atzerapen balio baxuenak ematen dituzte, kanal aldakorrerako MR eta PF bezalako diziplina tradizionalak gaindituz, Whittle-n eta ASPI-ren emaitzak oso antzekoak izanik. Horrez gainera, klase anitzeko inguruneetan ere (6.4 sekzioan) batz besteko atzerapenari erreferentzia eginez aukerarik onenak dira, klase barruan ere atzerapen baxuena eskuratzen dutelarik.

Era honetan, Whittle-ekin erkatuta ASPI-ren adierazpen analitikoa errazagoa izanda, eta gainera, Whittle ez bezala ASPI N kanal kopuru orokorrerako baliagarria denez, denboran aldakorrean den kanalean baliabideen planifikazioan helburua batz besteko atzerapena minimizatzea denean ASPI indize erregela erabiltzea aproposagoa dela ondorioztatzen da. Hala ere, kontsideratutako planifikazio estrategiaren artean ez dago bat ere atzerapenaren fairness-a bermatzen duenik.

Bestalde, aipatzekoa da ere ASPI zein ASPIM heuristikek kanal kondizio onenean dauden erabiltzaileei lehentasuna ematen dietela, eta kanal aldakorrean atzerapenaren

minimizazio problemarako tamaina esponentzialeko fluxuak daudenean ezaguna da propietate hori betetzen duten politikak sistemako erabiltzaile kopuruarekiko egonkorak direla $\rho < 1$ betetzen bada [Ayesta-b'2011]. Gisa honetan, frogatu ez den arren, simulazio emaitza numerikoen arabera, Pareto motako tamainen pean ASPI diziplinak erabiltzaile kopuruarekiko egonkorra dela dirudi, zeinak batz besteko atzerapena minimizatzen duen. Alabaina, ASPIM-en kasuan, nahiz eta kanal onenean egon MOS minimoa duten erabiltzaileei ez zaie lehentasuna ematen, MOS balio minimoa duten erabiltzaile horiek sisteman metatzen direlarik, eta sare karga altuetan egonkortasun baldintza hori oro har ez da betetzen.

Beraz, hemengo analisia kanal aldakorreko testuinguruan sare operadoreentzat sare baliabideen planifikazioaren helburuaren arabera scheduling estrategia egokiena hautatzeko erabilgarria izango da. Era honetan, xedea batz besteko QoE-a edota QoE-aren ekitatea maximizatzea denean, arestian eztabaidatutakoaren arabera, ASPIM edo GWM aukeratuko litzateke, eta batz besteko atzerapenaren minimizazioa lortu nahi izatekotan, berriz, ASPI.

7. Kapitulu

Ondorioak

Sare baliabideen esleipenean QoE-aware planifikazioaren beharraren aurrean, tesi lan honetan erabiltzaileen QoE-a maximizatzeko helburua duen sare baliabideen planifikaziorako scheduling algoritmoen lorpenean sakondu da. Horretarako, ikerketa hau matematika arloan ekarpen handia duten MDP markoan eta scheduling indize errege-lak lortzeko Gittins zein Whittle metodoetan zentratu da.

Kapitulu honetan tesiaren ondorio nagusiak aurkezten dira, ekarpen interesgarriak azpimarratuz eta burututako lanaren jarraipen lerro posibleak adieraziz. Modu honetan, 7.1 atalean garatutako lanaren deskribapena aurkezten da. Ondoren, 7.2 sekzioan, tesiaren ekarpen garrantzitsuenak azaltzen dira. Ostean, 7.3 puntuan, dokto-regaiaren burututako lanaren dibulgaziorako ekarpenak aurkezten dira bai ikerketa proiektuen kolaborazio eran bai argitalpenetan eta kongresuko artikuluetan eta aurkezpenetan. Bukatzeko, 7.4 atalean, tesi lan honen jarraipenerako ikerkuntza lerroak adierazten dira.

7.1 Burututako lana

Tesi lan honetan tesiaren aurrekarien 1.2 atalean trafiko fluxuen planifikaziorako optimizazio arloan detektatutako gabeziei aurre egin zaie, jarraian aurkezten diren lana garatu eta emaitzak eskuratu direlarik.

7.1.1 QoE-aren maximizaziorako eredu analitikoaren proposamena

Hasteko, baliabideen esleipen QoE-aware-aren abiapuntua den eredu analitikoa definitu da. Horretarako, QoE-aren maximizazioan oinarritutako optimizazio problema ego-kiro formulatu da MDP markoan. Eredu horrek erabiltzailearen QoE-aren modelaketarako atzerapenaren menpekoea den MOS utilitate funtzioaren zein fluxuen tamainarako Pareto banaketaren erabilera kontsideratzen ditu.

Proposatutako eredu analitikoak erabakiak hartzeko prozesuan QoE-awareness-a sartzen du, erabiltzailearen asebetetzea modelatzen duen atzerapenaren menpekoea den MOS utilitate funtzioa erabiliz. QoE-aware MDP eredu horren ezaugarri nagusia sariak definitzeko modua da. Kasu honetan, sariak era metatuan emateko modu tradizionalean ez bezala, atzerapenaren menpekoea den MOS funtzio normalizatua erabilita, erabiltzailearen benetako pertzepzioa islatzen duten sari ez nuluak fluxuaren transmisio osoa bukatutakoan soilik ematen dira. Horrez gain, esponentziala ez den banaketa konkretua jarraitzen duten fluxuen testuinguruan, eskuratutako zerbitzuaren menpekoea den uneko fluxuaren transmisioa bukatzeko probabilitatea erabiltzearen beharra ikusita, MDP-aren egoeren osagaiak eskuratutako zerbitzua eta atzerapena dira. Atzerapen osagai horren balioa denboran zehar handitzen da hautatutako akzioaren independenteki, eta beraz, lortutako QoE-aware MDP ereduak restless motakoa da.

Bestalde, MDP ereduaren ebazpenaren soluzio optimoa eskuratutako zerbitzua eta atzerapenaren menpekoea dela egiaztatu da, zeinak fluxu laburrak faboratzearen eta QoE degradazio gutxi jasan dutenei lehentasuna ematearen arteko konpromisoa bilatzen duen. Halere, MDP hori analitikoki eta konputazionalki ezin ebaztearen ondorioz, soluzio hurbilduak lortzera bultzatu du, Gittins edo Whittle metodoetan oinarritutako indize erregelak eskuratzera hain zuzen ere.

7.1.2 QoE-aren maximizaziorako indize erregelaren proposamena kanal konstantean

Ondoren, proposatutako oinarritzko QoE-aware MDP ereduak ebazteko zailtasuna dela eta, Gittins eta Whittle ebazpen metodoak erabilita analitikoki zein konputazionalki tratagarria den QoE-aware indize erregela proposatu da. Batetik, Gittins metodoaren

jatorrizko Gittins indizearen definizioan QoE-aware MDP ereduaren QoE-awareness-a sartuz, eta Pareto fluxu tamainak kontsideratuz, Gittins-en oinarritutako QoE-aware indize erregela ondorioztatu da. Bestetik, Whittle metodoaren bidez QoE-aware indize erregela eskuratzeko, lehendabizi gure QoE-aware eredurako Whittle indizearen definizioa aplikatu da. Jarraian indize horren adierazpenean eragina duten egoeren aktibotasuna zehazteko \mathcal{AG} -algoritmoa erabili da, horrela Whittle-n oinarritutako QoE-aware indize horren espresio itxia lortzen delarik. Aipatzekoa da bi ebazpen metodo horiek erabilia soluzio bera lortu dela, GWM deritzogun indize erregela hain zuzen ere. Hortaz, Whittle-n ikuspegiak MDP ereduaren restless ezaugarria kontenplazten badu ere, propietate hori kontuan hartzen ez duen Gittins metodoaren bidez emaitza bera eskuratzegatik, restless karakteristika horrek antza denez ereduaren jokamoldean ez du eraginik.

Ondorioztatutako diziplina hori uneko bukatzeko probabilitatearen eta MOS funtzio normalizatuaren arteko biderkadura da, eta beraz, estatistikoki bukatzeko gertuago dauden fluxuei eta QoE degradazio gehiegirik jasan ez dutenei lehentasuna ematearen arteko konpromisoa bilatzen du, soluzio optimoarekin koherentea izanik. Beraz, proposatutako indize erregela horren indizearen adierazpena sinplea eta tratagarria da, eta orduan, heuristika horren inplementazioa erraza zein exekuzioa arina dira, bere erabilerara edozein planifikatzailearen logikan ahalbidetuz.

Bestalde, GWM-en errendimendua egokia dela baieztatu da klase bakarreko zein klase anitzeko agertokietan. Kanal konstanterako, kontsideratutako estrategia ospetsuekin alderatuta, horien errendimendua kalitate subjektiboari dagokionez hobetzen du, ez soilik QoE-aren batz bestekoan baizik eta QoE-aren fairness-ean ere. Hori lortzeko, fluxuen transmisioa QoE-aren degradazioa hasi baino lehen amaitzen ahalegintzen da, atzerapenaren menpekoea den MOS funtziora egokitzen delarik. Horrez gain, klase anitzeko testuinguruan QoE-aren ikuspuntutik, klase bakoitzaren barruan kandidatek onena da, eta klaseen arteko fairness-a mantentzen du.

Horretaz aparte, kanal konstanterako proposatutako QoE-aware politika horrek, kanal aldakorrean, nahiz eta kanal aldakorrerako proposatu den QoE-aware diziplina ez gainditu, horien arteko aldea oro har ez da hain handia batz besteko MOS-ean ezta MOS-aren Jain indizeen balioetan ere, eta gainera, QoE-aware-k ez diren kontsideratutako diziplinak hobetuz. Hortaz, GWM-ren sinpletasuna ikusita, kasuaren arabera, GWM kanal aldakorrerako ere erabiltzea aproposa suerta daiteke.

7.1.3 QoE-aren maximizaziorako indize erregelaren proposamena denboran aldakorra den kanalean

Ostean, kanal aldakorreko testuinguruan QoE-aren maximizaziorako indize erregela proposatzeari ekin zaio.

Lehenik eta behin, kanal konstanterako QoE-aware MDP eredua kanal aldakorrerako hedatu da, egoera-osagaitzat kanal kondizioa sartuz eta kanalaren ondoriozko egoera trantsizio probabilitateak kontuan hartuz. Ondoren, eredu horren indize erregela motako soluzioa eskuratzeko Whittle-n oinarritutako metodologia bat erabili da. Metodologia horren lehenengo pausuan \mathcal{AG} -algoritmoa erabilita QoE-aware indize horien propietateak ondorioztatu dira, zerbitzatzeko multzoaren estruktura zehazten lagunduko dutenak. Dena den, zerbitzatzeko multzoaren estruktura erabat argia ez izanik, Whittle indizearen adierazpena eskuratzeko, bukatzeko probabilitateak zein MOS funtzioak erabaki une batean aldaketa gutxi jasaten dituztelaz baliatuz, zenbait hurbilketa eta sinplifikazio erabiliz ASPIM indize erregela ondorioztatu da.

Indize erregela hori QoE, tamaina zein kanalaren ezaugarrien menpekota da, kanal kondizio probabilitateak kontuan hartzen dituelarik. QoE-aware politika horrek kanal onenean dauden eta QoE-ean saturaturik ez dauden erabiltzaileei lehentasuna ematen die. Batetik, kanal onenean GWM diziplinaren baliokidea da, eta bestetik, kanal kondizioa onena ez izatekotan, indizearen balioa uneko bukatzeko probabilitatearen eta MOS funtzio normalizatuaren arteko biderkadura eta bukatzeko probabilitatearen hobekuntza itxaropenaren arteko ratioa da. Eskuratutako indize erregela berri hori sinplea eta tratagarria da, baina indize erregela baldintzatua izanik eta goi-limitea duen batukaria duelarik, eta batez ere, kanal egoera probabilitateen menpekotasuna dela eta, kanal konstanterako proposatutako GWM politika baino konplexuagoa da.

QoE-aware scheduling algoritmo berri horren errendimenduari erreferentzia eginez, erabilitako hurbilketa errore nabariaren menpe eta kanal transmisio tasak multiploak ez diren eta kanalaren artean korrelazioa ematen den wireless sare errealean batean ere, kalitate subjektiboari dagokionez emaitza ezin hobekak ematen ditu, kontsideratutako gaintzeko diziplina ezagun guztiak hobetuz bai klase bakarreko bai klase anitzeko testuinguruetan. Horretarako, diziplina hori fluxuen transmisioaren bukaera atzerapenaren behe-atalasea aurretik gauzatzen saiatzen da, QoE-aren atzerapenaren menpekota den utilitate funtziorako egokitzapena eskuratzuz.

7.1.4 Fluxu tamaina banaketa orokorrerako atzerapenaren minimizaziorako indize erregelaren proposamena denboran aldakorra den kanalean

Horrez gain, atzerapenaren minimizaziorako problemek duten garrantzia ikusita, eta kanal aldakorrean tamaina banaketa orokorrerako helburu hori duen indize erregelarik ez existitzearen ondorioz, kanal aldakorreko testuinguruan tamaina banaketa orokorra duten fluxuentzat atzerapena minimizatzea helburutzat duen politika eskuratzearen gaia landu da.

Lehendabizi, aurretik existitzen den kanal aldakorrerako fluxuen tamaina esponentzialak kontsideratzen dituen atzerapenaren minimizaziorako MDP ereduarekin alde-ratuta, kanal kondizioaz gain, eskuratutako zerbitzua kontuan hartzen duen MDP ere-dua planteatu da. MDP eredu horren ebazpen optimoa ezin lortzeaz gain, horren indi-ze erregela motako soluzio tratagarria lortzeko Whittle metodoaren bidezko ebazpena zaildu egiten da. Horren arrazoia, AG -algoritmoko emaitzen arabera, Whittle prozedu-raren zerbitzatzeko multzoaren estruktura erabat argia ez izatea da.

Modu honetan, tamaina banaketa orokorrerako Whittle indizearen adierazpen kon-plikatuena eskuratu da. Dena den, DGHR motakoak diren Pareto tamaina banaketen-tzat eta bi kanal egoeretarako aurreko espresioa sinplifikatzen da Whittle indizearen adierazpen tratagarria lortzen delarik, baina N kanalentzat zaila izaten jarraitzen due-larik. Era honetan, erabaki une batetik bestera bukatzeko probabilitatearen gradientea txikia dela kontsideratuz, Whittle metodoari zenbait hurbilketa eta sinplifikazio apli-katu zaizkio, eta N kanalentzat sinplea den ASPI Whittle indize erregela hurbildua es-kuratu da. Bi kanalen kasurako ASPI-ren espresioa Whittle-ena baino errazagoa da. Horretaz aparte, bi kasuetan kanal onenari lehentasuna eman zaio. Gainera, ASPI di-ziplinak, fluxu tamaina esponentzialak kontsideratzen dituen PI politikaren antzera, kanal kondizioa onena ez izatekotan, indizearen balioa uneko bukatzeko probabilita-tearen eta bukatzeko probabilitatearen hobekuntza itzaropenaren arteko ratioa da.

Atzerapenerako proposatutako bi politika horien errendimenduari dagokionez, bi kanalen kasuan ASPI-k eta Whittle-k antzeko emaitzak ematen dituztela egiaztatu da, kontsideratutako politika garrantzitsuenekiko alderatuta batz besteko atzerapena mi-nimizatzen dutelarik klase bakarreko zein klase anitzeko kasuetan, erabilitako hurbil-keten errorea nabarmena denean eta multiploak ez diren transmisio tasak dituen kanal eredu korrelatuan ere. Beraz, ASPI N kanal kopuru orokorrerako baliagarria izanik, eta N kanaleko agertokietan batz besteko atzerapen baxuenak ematen dituela ikusita, ka-nal aldakorrean atzerapenaren minimizaziorako ASPI aukerarik aproposena dela esan daiteke.

7.1.5 Proposatutako indize erregelen balioztatzea

Bestalde, proposatutako planifikazio indize erregelen errendimendua egokia dela aztertzeko balioztatze metodologia zehatza erabili da bai kanal konstanterako bai kanal aldakorrerako.

Horretarako, gure proposamenen errendimendua ezagunak eta garrantzia handia duten scheduling algoritmoek dutenarekin alderatu da adierazgarriak diren barietate ugariko agertokietan. Balioztatzea egiteko definitutako agertokiak arreta handiz aukeratu dira, tamaina, QoE, kanal eta kostu aspektuak bere osotasunean kontenplatu. Honekin batera, klase bakarreko zein klase anitzeko konfigurazioak kontuan hartu dira. Horrez gainera, kanal aldakorreko testuinguruan kanal kalitatearen adierazleak diren CQI-en menpekoak diren transmisio tasak erabiliko dira. Gainera, errealitatearen isla-pena diren LTE sare errealeko kanal trazarak ere erabili dira.

Horrez gain, errealitatea egokiro islatzen duten trafiko ezaugarriak kontenplatu dira, Pareto tamaina banaketak kontsideratuz eta batz besteko tamaina errealistak erabiliz. Honekin batera, trafiko fluxu horiei dagokien QoE ezaugarria parametro egokiak dituen atzerapenaren menpekoa den MOS funtzioaren bidez karakterizatzen da. Horrela, QoE-an eragina duten parametro horien balio aproposak erabiliko dira, fluxu tamaina, sare mota eta erabiltzaileek zerbitzuarekiko duten exigentzia edota iaioetasuna kontuan hartuz.

Proposatutako planifikazio estrategien balioztatzea egiteko, arestian deskribatutako karakteristikak dituen sare baliabideen planifikaziorako sare ingurune hori Matlab-en inplementatu da. Burututako simulazioei dagokienez, iraupen nahiko luzea duten simulazioak egin dira (simulazio iraupena 10000 s) eta gainera, simulazio bakoitza 10 aldiz errepikatu da. Horrek analisirako lortutako errendimendu metriken fidagarritasuna bermatzen du.

Modu honetan, sare egoera (karga) desberdinetan, kontsideratutako scheduling algoritmoen lau errendimendu metriken azterketa egin da; batz besteko MOS-a, batz besteko atzerapena, eta ekitatearen analisirako MOS-aren zein atzerapenaren Jain indizeak analizatu dira. Gainera, bai kanal konstanterako bai kanal aldakorrerako definitutako oinarritzko agertokiaren kasuan MOS-aren zein atzerapenaren estatistikoak aztertu dira, proposatutako planifikazio estrategien portaera justifikatzeko baliagarriak izan direnak (atzerapenaren minimizaziorako oinarritzko kasuan sistemako erabiltzaile kopuruaren azterketa egin da ere). Horrez gain, kanal anitzeko agertokietan klase bakoitzaren barruko portaera eta klaseen arteko eraketa analizatu dira batz besteko MOS-aren edota batz besteko atzerapenaren metrikentzat.

Ondorioz, balioztatze metodologia horren pean egindako errendimenduaren azterketaren arabera, QoE-aren maximizaziorako proposatutako GWM (kanal konstantean)

eta ASPIM (kanal aldakorrean) indize erregelek zein kanal aldakorrean atzerapenaren minimizaziorako proposatutako Whittle eta ASPI politikek euren helburua betetzen dutela egiaztatu da.

7.2 Tesiaren ekarpenak

Aurreko ondorioetan azaldu denaren arabera, tesi honen ekarpen adierazgarrienak burututako lau proposamenetan sailka daitezke. Horrez gain, balioztatzeari dagozkion ekarpenak ere kontenplatu dira.

7.2.1 Proposatutako QoE-aware eredu analitikoa

- **QoE-awareness-a scheduling eredu analitikoan sartzea.** Baliabideen esleipenerako MDP ereduan kalitate subjektiboa sartzek aurrera pausu analitikoa islatzen du, sare baliabideen kudeaketarako QoE-aware scheduling algoritmoen diseinuan erabilgarria suertatzen delarik. MDP markoan sariak definitzeko erari dagokionez, sari metatze tradizionalan ez bezala, sari ez nulu bakarria erabiltzaileen pertzepzioa adierazten duen utilitate funtzio baten bidez fluxuaren transmisioa bukatutakoan ematen da soilik. Horrez gain, gure kasuan QoE-aren adierazlea den MOS funtzioa atzerapenaren menpekota da, eta hortaz, atzerapena MDP-aren egoera-osagaia da.
- **Oinarrizko QoE-aware planifikaziorako QoE-aware plataforma analitikoa sinplea eta hedagarria definitzea.** Proposatutako eredu QoE-a maximizatzea helburutzat duten planifikazio problemen oinarria da, problema konplexuagoetara hedagarria izanik. Batetik, QoE-a modelatzeko eredu konplexuagoak sartzea ahalbidetuko luke, adibidez, QoE-aren utilitate funtzioa atzerapenaren menpekota soilik ez izanik, atzerapenaz gain MDP-aren egoera-osagai gehiago kontsideratuz. Bestetik, kanal eredu konplexuagoetara ere hedagarria da, denboran zehar aldatzen den kanalera esate baterako, kanal kondizioa egoera-osagai kontsideratuz eta kanal egoeren arteko trantsizio probabilitateak kontuan hartuz.

7.2.2 Proposatutako GWM scheduling indize erregela

- **Kanal konstantean erabiltzaileen QoE-aren maximizazioa bermatzeko erabiltzea.** QoE-ari dagokionez GWM diziplinak kanal konstanterako erabiltzen diren politika ospetsuenak hobetzen dituela egiaztatu da kanal kapazitatea konstantea denean. Hortaz, QoE-aware planifikazio politika berri hori sare hornitzaileek euren bezeroei satisfakzio maila egokiak bermatzeko erabilgarria izango da, kanalak denboran aldakortasunik ez duenean.
- **Kanal aldakorrean planifikazio estrategia ospetsuekiko erabiltzaileen kalitate subjektiboa hobetzeko erabiltzea.** Kanal aldakorreko testuinguruan, QoE-a hobetu nahi bada, lortu daitezkeen hobekuntza maximoa lortu gabe, QoE-aren

maximizazioen zehaztasuna galduz, GWM-ek kalitate subjektiboari dagokionez politika tradizionalak gaitzen dituela baieztatu da. Gainera, politika horren indizearen adierazpena zein indize erregela errazak izanik, kanal eredurik behar ez delarik, scheduling algoritmoaren konplexutasuna murriztearen ondorioz, bere erabilera kanal aldakorreko sareetan aproposa da.

- **QoE-aren eremuan Gittins zein Whittle metodoen baliagarritasuna egiaztatzea.** QoE-a maximizatzeko helburuarekin Gittins zein Whittle metodoaren bidez eskuratzeko GWM politikaren sinpletasuna eta errendimendu ona ikusita, matematika arloan ekarpen handia duten bi metodo horiek ez dira soilik egokiak atzerapenaren minimizazioaren testuinguruan, baizik eta kalitate subjektiboa maximizatzea helburutzat duten indize erregela proposak lortzeko baliagarriak dira ere.
- **Beste QoE-aware planifikazio indize erregelen oinarria izatea.** Bai QoE-aware indize erregela lortzeko metodologia bai indize erregela bera beste QoE-aware indize erregela konplexuagoak proposatzeko oinarria izango dira. Hau da, politika hori eskuratzeko ebazpen metodoa zein indize erregela bera beste QoE-aware planifikazio eskemetara hedagarria da. Esate baterako, QoE-aren modelaketarako QoE utilitate funtzio konplexuagoak erabiltzen badira, ez atzerapenaren menpekoak soilik edota forma konplikatuagoa izanik.

7.2.3 Proposatutako ASPIM scheduling indize erregela

- **Kanal aldakorrean erabiltzaileen QoE-aren maximizazioa bermatzeko erabiltzea.** Simulazioetan egiaztatu denaren arabera, kanal aldakorrean helburua ahalik eta QoE maila altuenak lortu nahi izatekotan bai batz bestekoan bai ekitatean, ASPIM aukera onena da, planifikazio estrategia erabilienak hobetzen dituelarik. Beraz, gaur egungo wireless sareetan, kanal aldakorrerako proposatutako QoE-aware proposamen berri hori sare hornitzaileentzat euren bezeroei satisfakzio maila egokiak bermatzeko erabilgarria suertatzen da. Dena den, kontuan hartzekoa da, politika horrek kanal konstanterako proposatutako GWM diziplinak baino inplementazio zein exekuzio ikuspuntutik konplexutasun altuagoa erakusten duela.
- **Kanal aldakorreko QoE-aware planifikazio eskema konplexuagoen oinarria izatea.** Kanal aldakorrerako proposatutako indize erregela bera zein politika hori eskuratzeko Whittle-n oinarritutako metodologia etorkizuneko kanal aldakorreko beste testuinguru eta QoE eskema konplexuagoetara aplikagarriak edota hedagarriak izan daitezke.

- **Beste testuinguruetan Whittle metodoan erabilitako hurbilketen adibidea izatea.** Gure ikasketa kasuan erabaki une batetik bestera bukatzeko probabilitatearen eta QoE utilitate funtzioaren aldaketak motelak izanik, QoE-aware Whittle indize hurbildua eskuratu da. Dena den, Whittle metodoaren hurbilketa eta sinplifikazio horien ikuspegia edozein arlotara aplikagarria da erabaki une batetik bestera sistemaren osagaien gradiente txikia izatekotan.

7.2.4 Proposatutako Whittle eta ASPI scheduling indize erregelak

- **Kanal aldakorrean atzerapenaren minimizazioa bermatzeko ASPI erabiltzea.** Kanal aldakorreko agertokietan ASPI-ren batz besteko atzerapenari dagokion errendimendua egokia dela ikusita, wireless sare bat bezalako kanal aldakorreko testuinguruan sare operadoreen helburua trafikoaren atzerapena minimizatzea denean ASPI scheduling algoritmoa erabiltzea aproposa da.
- **Fluxu tamaina orokorrerako kanal aldakorrean atzerapenaren minimizaziorako indize erregelak diseinatzearen oinarria izatea.** Kanal aldakorrean atzerapenaren minimizazioa helburutzat duten proposatutako bi politika horiek eskuratzeko eredutzeak zein ebazpen metodologiak arlo analitikoan aurrera pausu handia suposatzen dute. Modu honetan, atzerapenaren minimizazio problemarako, kanalak eboluzio estokastikoa duenean fluxu tamaina banaketa orokorrak kontsideratzen dituen lan aitzindaria da. Horrez gain, indize erregela motako planifikazio estrategiak lortzeko erabilitako Whittle-n oinarritutako ebazpen metodologia kanal aldakorrean atzerapena minimizatu nahi denean eredu konplexuagoak modelatu eta ebazteko oinarria da.
- **Beste testuinguruetan Whittle metodoan erabilitako hurbilketaren adibidea izatea.** Gure ikasketa kasurako erabaki une batetik bestera bukatzeko probabilitatearen aldaketak motelak izateak tratagarria eta ondo funtzionatzen duen Whittle indize hurbildua lortzea ahalbidetu digu. Ikuspegi hori aztergai den optimizazio problemaren osagaien denboran zeharreko gradiente txikia denean edozein testuingurura aplikagarria da.

7.2.5 Proposatutako indize erregelen balioztatzea

- **Balioztatze metodologiaren identifikazio eta garapena.** Proposatutako indize erregelen errendimendua egokia dela egiaztatzeko balioztatze metodologia arretaz definitu da. Horretarako, planifikazio proposamenen errendimendu azterketa baliagarria izan dadin, balioztatze hori aurrera eramateko esanguratsuak diren agertokiak identifikatu dira. Gainera, agertoki horietan aztertu diren erkaketa

planifikazio diziplinak eta trafikoaren, QoE-aren, sarearen eta simulazioen ezaugarriak arretaz aukeratu dira. Beraz, balioztatze metodologia hori sare planifikazio arloan proposamen berrien balioztatzea egiteko prozedura erabilgarria izan daiteke.

- **Balioztatze ingurunearen erabilpena edozein sare planifikazio testuingurutan.** Inplementatutako sare baliabideen planifikaziorako plataforma ikasketa honetan landutako testuingurutik desberdintzen den beste inguruneetara hedagarria da. Modu honetan, simulazio plataforma horrek, planifikazio estrategia berriak, beste karakteristikak dituzten trafiko fluxuak (tamaina edota QoE ezaugarriari dagokienez), eta beste kanal ereduak sartzeko malgutasuna erakusten du.

7.3 Kontribuzioak

Tesi lan hau modu analitikoan sare baliabideen esleipenerako planifikazio estrategien lorpenarekin erlazionatuta dagoen ikerkuntza lerroaren barruan sartzen da, hala nola QoE-arekin eta QoS-arekin erlazionatutakoan ere, zeinetan doktoregaiak bere ikerkuntza lanak garatu dituen.

Bere esperientzia arlo horietan ezinbestekoa izan da lan honen garapenerako, eta foro desberdinetan emaitzen argitalpenagatik eta zenbait proiektuetan parte hartzeagatik berretsita geratzen da.

Jarraian tesi lan honen kontribuzio nagusiak aurkezten dira.

7.3.1 Argitalpenak, eta artikulak eta aurkezpenak kongresuetan

7.3.1.1 Argitalpenak

EGILEAK: Ianire Taboada, Fidel Liberal, Jose Oscar Fajardo, Urtzi Ayesta

IZENBURUA: **QoE-aware optimization of multimedia flow scheduling**

ALDIZKARIA: Computer Communications (JCR IF: 1.079, 2012)

URTEA: 2013 (Internet-en erabilgarri)

EGILEAK: Ianire Taboada, Jose Oscar Fajardo, Fidel Liberal

IZENBURUA: **Performance Analysis of Scheduling Algorithms for Web QoE Optimization in Wireless Networks**

ALDIZKARIA: Journal of Network Protocols and Algorithms

LIB.: 4 ORRIAL.: 27-43 URTEA: 2012

EGILEAK: Fidel Liberal, Ianire Taboada, Jose Oscar Fajardo

IZENBURUA: **A lightweight network state estimation mechanism in ARQ-based wireless networks**

ALDIZKARIA: Telecommunication Systems (JCR IF: 1.027, 2012)

ORRIAL.: 1-21 URTEA: 2013

EGILEAK: Bego Blanco, Fidel Liberal, Ianire Taboada

IZENBURUA: **Suitability of ad hoc routing in WNR: Performance evaluation and case studies**

ALDIZKARIA: Ad Hoc Networks (JCR IF: 1.456, 2012)

LIB.: 11 ORRIAL.: 1165-1177 URTEA: 2013

EGILEAK: Fidel Liberal, Ianire Taboada, Jose Oscar Fajardo

IZENBURUA: **Dealing with Energy-QoE tradeoffs in mobile video**

ALDIZKARIA: Journal of Computer Networks and Communications (SJIR IF: 0.103, 2012)

URTEA: 2013

EGILEAK: Jose Oscar Fajardo, Ianire Taboada, Fidel Liberal

IZENBURUA: **Cross-layer cross-domain adaptation of mobile video services**

ALDIZKARIA: ICST Transactions on Mobile Communications and Applications

LIB.: 12 ORRIAL.: 1-11 URTEA: 2012

EGILEAK: Nikos Zotos, Jose Oscar Fajardo, Harilaos Koumaras, Lenia Boula, Fidel Liberal, Ianire Taboada, Monica Gorricho

IZENBURUA: **Perceived QoE for User-Centric Multimedia Services**

LIBURUA: Media Networks: Architectures, Applications, and Standards

ORRIAL.: 295-345 URTEA: 2012

EGILEAK: Jose Oscar Fajardo, Ianire Taboada, Fidel Liberal

IZENBURUA: **Quality assessment for mobile media-enriched services: impact of video lengths**

ALDIZKARIA: Communications in Mobile Computing

LIB.: 1 ORRIAL.: 1-5 URTEA: 2012

EGILEAK: Jose Oscar Fajardo, Ianire Taboada, Fidel Liberal

IZENBURUA: **QoE-driven and network-aware adaptation capabilities in mobile multimedia applications**

ALDIZKARIA: Multimedia Tools and Applications (JCR IF: 0.617)

URTEA: 2011 ORRIAL.: 1-22

7.3.1.2 Artikuluak eta aurkezpenak kongresuetan

EGILEAK: Ianire Taboada, Jose Oscar Fajardo, Fidel Liberal, Bego Blanco

IZENBURUA: **Size-Based and Channel-Aware Scheduling Algorithm Proposal for Mean Delay Optimization in Wireless Networks**

KONGRESUA: IEEE International Conference on Communications (ICC)

PARTE-HARTZE MOTA: Ahozkoa

LEKUA ETA URTEA: Ottawa (Kanada), 2012

ARGITALPENA: Proceedings

EGILEAK: Ianire Taboada, Jose Oscar Fajardo, Fidel Liberal

IZENBURUA: **QoE and energy-awareness for multi-layer video broadcasting**

KONGRESUA: IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME)

PARTE-HARTZE MOTA: Ahozkoa

LEKUA ETA URTEA: Bartzelona, 2011

ARGITALPENA: Proceedings

EGILEAK: Ianire Taboada, Fidel Liberal, Jose Oscar Fajardo

IZENBURUA: **Delay modeling for 3G mobile multimedia services QoE estimation**

KONGRESUA: Mobile Lightweight Wireless Systems (Mobilight)

PARTE-HARTZE MOTA: Ahozkoa

LEKUA ETA URTEA: Bilbo, 2011

ARGITALPENA: Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Eng.

EGILEAK: Asiya Khan, Lingfen Sun, Jose Oscar Fajardo, Ianire Taboada, Fidel Liberal, Emmanuel Ifeacho

IZENBURUA: **Impact of end devices on subjective video quality assessment for QCIF video sequences**

KONGRESUA: International Workshop on Quality of Multimedia Experience (QoMEX)

PARTE-HARTZE MOTA: Ahozkoa

LEKUA ETA URTEA: Mechelen (Belgika), 2011

ARGITALPENA: Proceedings

EGILEAK: Jose Oscar Fajardo, Ianire Taboada, Fidel Liberal, Armando Ferro

IZENBURUA: **Cross-layer adaptation of H.264/AVC over 3G UMTS mobile video services**

KONGRESUA: Mobile Lightweight Wireless Systems (Mobilight)

PARTE-HARTZE MOTA: Ahozkoa

LEKUA ETA URTEA: Bilbo, 2011

ARGITALPENA: Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Eng.

EGILEAK: Eva Ibarrola, Fidel Liberal, Ianire Taboada, Rodrigo Ortega
IZENBURUA: **Web QoE Evaluation in Multi-Agent Networks: Validation of ITU-T G.1030**
KONGRESUA: 5th International Conference on Autonomic and Autonomous Systems (ICAS)
PARTE-HARTZE MOTA: Ahozkoa
LEKUA ETA URTEA: Balentzia, 2009
ARGITALPENA: Proceedings

EGILEAK: Iñaki Etxebarria, Luis Burgos, Ianire Taboada, Eduardo Saiz
IZENBURUA: **Diseño e implementacin de un sistema de gestión y mantenimiento para el servicio velocimetro.org**
KONGRESUA: XXIII Simposium Nacional URSI
PARTE-HARTZE MOTA: Ahozkoa
LEKUA ETA URTEA: Madril, 2008
ARGITALPENA: Proceedings

7.3.2 Ikerketa kontratuak eta proiektuak

7.3.2.1 Ikerketa kontratuak

KONTRATUAREN IZENA: GERYON
ENPRESA: UPV/EHU
IRAUPENA: 2012/04/23 - ...

KONTRATUAREN IZENA: Internship BCAM-en
ENPRESA: BCAM (Basque Center of Applied Mathematics)
IRAUPENA: 2013/01/14 - 2013/07/14

KONTRATUAREN IZENA: LABEL
ENPRESA: UPV/EHU
IRAUPENA: 2011/04/12 - 2011/09/19

KONTRATUAREN IZENA: ADA-NGN

ENPRESA: UPV/EHU

IRAUPENA: 2009/05/01 - 2011/04/11

KONTRATUAREN IZENA: OptimMOS: Sistema de adaptación dinámica multicriterio enfocada a la PQoS

ENPRESA: UPV/EHU

IRAUPENA: 2008/07/01 - 2009/04/30

7.3.2.2 Proiektuak

PROIEKTUAREN IZENA: Efficient control methods and algorithms for dynamic resource-sharing systems

ENTITATE FINANTZAILEA: Espainako Ekonomia eta Lehiakortasun Ministerioa

IRAUPENA: 2011/01/01 - ...

PROIEKTUAREN IZENA: LABEL

ENTITATE FINANTZAILEA: Eusko Jaurlaritza

IRAUPENA: 2010/06/01 - 2012/06/30

PROIEKTUAREN IZENA: ICT ADAMANTIUM - ADaptative Management of mediA distribution based on satisfaction oriented User Modelling

ENTITATE FINANTZAILEA: Europear batasuna

IRAUPENA: 2008/03/01 - 2010/08/31

7.4 Etorkizuneko lerroak

Tesi lan honetan ikuspegi analitikotik sare baliabideen planifikaziorako scheduling algoritmoen diseinurako prozedurak emateaz gain, metodologia horiek erabilia QoE-aren maximizaziorako zein atzerapenaren minimizaziorako planifikazio proposamen berriak eskuratu dira. Gainera, proposatutako planifikaziorako eredu analitikoak zein ebazpen metodologiak, generikoak izanik, horien egokitzapena sare agertoki eta teknologia berrietara zein QoE eskema berrietara ahalbidetzen da. Modu honetan, lan honetan lortutako emaitzak gaur egungo eta etorkizuneko sareetan scheduling algoritmoak garatzeko oinarri matematiko garrantzitsua dira.

Bestalde, lan honetan lortutako emaitzen aplikazio praktikoan sakontzea zein hobetzea beharrezkoa da. Jarraian, sakontze eta hobekuntza horretarako interesgarriak kontsideratzen diren ikerkuntza lerroak laburbiltzen dira:

- **Proposatutako planifikazio politiken ikasketa zerbitzu aniztasuna onartzen duten inguruneetan.** Gaur egungo 4G sareetan irrati-espektra uneoro erabiltzaile ezberdinen artean partekatzea onartzen da. Lan honetan denbora une bakoitzean sarearen banda zabalera osoa erabiltzaile bakarrak erabiltzen duela kontsideratzen da. Hortaz, paraleloan erabiltzaile anitz zerbitzatzen diren testuinguruan planifikazio indize erregela proposamenen errendimendua ikastea edota ingurune horietara egokitzen diren scheduling proposamenen eskuraketa aztertzea etorkizuneko lerro posiblea da.
- **Kanal korrelatuko ingurunean planifikazioaren azterketa.** Benetako wireless sareetan kanal kondizioen artean korrelazioa existitzen dela ezaguna izanik, kanal korrelatuko testuinguruan kanal aldakor independenterako proposatutako scheduling algoritmoen errendimendua egokia dela egiaztatu bada ere, kanal korrelaturako planifikazio proposamenen lorpena aztertzeaz dago.
- **CQI-en bidaltze abiadurak proposatutako scheduling algoritmoen errendimenduan duen inpaktuaren analisisa.** Wireless sare batean erabiltzaile mugikorretatik oinarri-estaziora TTI guztietan CQI txostenak bidaltzearen ondoriozko seinalizazio trafikoak sareko errendimendua txarragotu dezake. Hori dela eta, praktikan txosten horiek maiztasun baxuagorekin bidali behar dira. Hala ere, scheduling une bakoitzean kanal egoeraren informazio atzeratua eta ez zehatza izateak planifikazio algoritmoen errendimenduan eragina du. Beraz, goranzko seinalizazio kargaren minimizazioaren eta scheduling diziplinen errendimenduaren hobekuntzaren artean konpromiso bat existitzen da. Modu honetan, CQI-en bidaltze abiadurak proposatutako scheduling algoritmoen errendimenduan duen inpaktua az-

tertzea beharizan bat bilakatzen da. Gainera, CQI-en bidaltze abiadura jaisterakoan, kanal kalitatearen informazio hori nola bidali (esate baterako, bidali gabeko CQI-en batz bestekoa edo aldiuneko CQI-a) erronka bat da.

- **Beste QoE utilitate funtzioetarako azterketa.** Aurkeztutako lana QoE-aren modelaketarako atzerapenaren menpekora den forma logaritmikoa duten MOS funtzioetan zentratu da. Dena den, etorkizuneko lan bezala, forma orokorra duen QoS parametro bat edo gehiagoren menpekora den MOS funtzio bat erabiliz proposatutako scheduling algoritmoen, edo horien bertsio aldatuaren, ikasketa egitea planteatzen da.
- **Tamaina banaketa orokorrerako scheduling algoritmoen proposamena.** Ikerketa honetan sare baliabideen scheduling problemarako proposatutako eredu analitikoak tamaina banaketa orokorrerako baliagarriak dira. Hala ere, eredu horietan oinarrituz ondorioztatutako indize erregelen eskuraketan Pareto banaketak kontsideratu dira. Hortaz, tamaina banaketa orokortasun horren pean scheduling indize erregelen lorpena etorkizunean lantzeko gaia da.
- **Fluxu mailako emaitzen estropolazioa pakete mailara.** Gaur egungo sare elementuek pakete mailan lan egiten dutela jakinda, gure fluxu mailako planifikatzaile proposamenek fluxu baten zenbat bit transmititzen diren zehaztuko dute, eta erabaki hori pakete mailan mapeatuko dute. Dena den, fluxu mailako ikuspegia zerbitzu baten errendimendu globala aztertzeke egokia bada ere, fluxu bat osatzen duten paketeen artean QoS-aren zein QoE-aren bukaerako inpaktuan eragin edota garrantzia ezberdina duten paketeak existitzen dira. Hori dela eta, fluxu bateko paketeen artean lehentasunak ematea aproposa suertatzen da, eta hortaz, lan honetan lortutako planifikaziorako ereduak zein scheduling diziplinak pakete mailara itzultzea interesekoa izan daiteke.
- **Berdinketa haustearen hobekuntza.** Erabaki une berdinean erabiltzaile bat baino gehiago zerbitzatzeko proposak direnean, berdinketa hauste erregela egokia hautatzea esentziala da. Beraz, etorkizuneko ikerkuntzan, ausazko edo FIFO motako berdinketa hauste erregela tipikoak erabili ordez, berdinketa hauste berriak proposatu eta balidatuko dira, esate baterako tamaina edota kanal informazioa erabilia.

Bibliografia

- [3GPP'2010] 3GPP TS-123107 v9.0.0. Quality of Service (QoS) concept and architecture, 2010.
- [Aalto'2007] S. Aalto and P. Lassila. Impact of size-based scheduling on flow level performance in wireless downlink data channels. In *Proceedings of the 20th international teletraffic conference on Managing traffic performance in converged networks*, pages 1096–1107. Springer-Verlag, 2007.
- [Aalto'2008] S. Aalto and U. Ayesta. Optimal scheduling of jobs with a DHR tail in the M/G/1 queue. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools*, page 50. ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering), 2008.
- [Aalto'2010] S. Aalto and P. Lassila. Flow-level stability and performance of channel-aware priority-based schedulers. In *Next Generation Internet (NGI), 2010 6th EURO-NF Conference on*, pages 1–8. IEEE, 2010.
- [Aalto'2011] S. Aalto, U. Ayesta, and R. Righter. Properties of the Gittins index with application to optimal scheduling. *Probability in the Engineering and Informational Sciences*, 25(03):269–288, 2011.
- [Al-Zubaidy'2012] H. Al-Zubaidy, I. Lambadaris, and Y. Viniotis. Optimal scheduling in multi-server queues with random connectivity and retransmissions. *Computer Communications*, 2012.
- [Ameigeiras'2010] P. Ameigeiras, J.J. Ramos-Munoz, J. Navarro-Ortiz, P. Mogensen, and J.M. Lopez-Soler. QoE oriented cross-layer design of a resource allocation algorithm in beyond 3G systems. *Computer Communications*, 33(5):571–582, 2010.
- [Avrachenkov'2010] K.E. Avrachenkov, U. Ayesta, and N. Osipova. Conditional sojourn time of optimal scheduling policy in a multi-class single-server queue? *Modern Trends in Controlled Stochastic Processes*, page 284, 2010.

- [Avrachenkovt'2004] K. Avrachenkovt, U. Ayesta, P. Brown, and E. Nyberg. Differentiation between short and long TCP flows: Predictability of the response time. In *INFOCOM 2004. Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, volume 2, pages 762–773. IEEE, 2004.
- [Ayesta'2010] U. Ayesta, M. Erausquin, and P. Jacko. A modeling framework for optimizing the flow-level scheduling with time-varying channels. *Performance Evaluation*, 67:1014–1029, 2010.
- [Ayesta-a'2011] U. Ayesta, M. Erausquin, and P. Jacko. Resource Sharing in a Single Server with Time-Varying Capacity. In *Allerton Conference*, 2011.
- [Ayesta-b'2011] U. Ayesta, M. Erausquin, M. Jonckheere, and I. M. Verloop. Scheduling in a random environment: Stability and asymptotic optimality. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 21(1):258–271, 2013.
- [Bellman'1966] R.E. Bellman. *Adaptive control processes: A guided tour*. Princeton University Press, 1966.
- [Bertsekas'1995] D.P. Bertsekas. *Dynamic programming and optimal control*, volume 1. Athena Scientific Belmont, MA, 1995.
- [Bolia'2009] N. Bolia and V. Kulkarni. Index policies for resource allocation in wireless networks. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 58(4):1823–1835, 2009.
- [Bonald'2004] T. Bonald. A score-based opportunistic scheduler for fading radio channels. In *Proceedings of European Wireless*, pages 283–292, 2004.
- [Borst'2005] S. Borst. User-level performance of channel-aware scheduling algorithms in wireless data networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 13(3):636–647, 2005.
- [Boutilier'1995] C. Boutilier, R. Dearden, M. Goldszmidt, et al. Exploiting structure in policy construction. In *International Joint Conference on Artificial Intelligence*, volume 14, pages 1104–1113. Lawrence Erlbaum Associates LTD, 1995.
- [Cecchi'2013] F. Cecchi and P. Jacko. Scheduling of users with Markovian time-varying transmission rates. In *Proceedings of the ACM SIGMETRICS/international conference on Measurement and modeling of computer systems*, pages 129–140. ACM, 2013.

- [Cerqueira'2009] M. Mu, E. Cerqueira, F. Boavida, and A. Mauthe. Quality of Experience management framework for real-time multimedia applications. *International Journal of Internet Protocol Technology*, 4(1):54–64, 2009.
- [Chen'2012] Huan Chen, Chih-Chuan Cheng, Wei-Ho Chung, and Hsi-Hsun Yeh. A reduced dimension MDP-based call admission control scheme for next generation telecommunications. In *Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2012 8th International*, pages 984–989. IEEE, 2012.
- [Elliott'1963] E.O. Elliott. Estimates of error rates for codes on burst-noise channels. *Bell System Technical Journal*, 42(5):1977–1997, 1963.
- [Fiedler'2010] M. Fiedler, T. Hossfeld, and P. Tran-Gia. A generic quantitative relationship between Quality of Experience and Quality of Service. *Network, IEEE*, 24(2):36–41, 2010.
- [Gilbert'1960] E.Ñ. Gilbert. Capacity of a burst-noise channel. *Bell Systems Technical Journal*, 39:1253–1266, 1960.
- [Gittins'1979] J.C. Gittins. Bandit processes and dynamic allocation indices. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, pages 148–177, 1979.
- [Hu'2004] M. Hu, J. Zhang, and J. Sadowsky. Traffic aided opportunistic scheduling for wireless networks: algorithms and performance bounds. *Computer Networks*, 46(4):505–518, 2004.
- [ITU-T'2003] J.A. Bergstra and C.A. Middelburg. ITU-T Recommendation G. 107: The E-Model, a computational model for use in transmission planning. 2003.
- [ITU-T'2004] ITU-T. Quality of Service and network performance, 2004.
- [ITU-T'2007] ITU-T. P.10/G.100 (2006) Amendment 1 (01/07): New Appendix I - definition of Quality of Experience (QoE), 2007.
- [Ibarrola'2009] E. Ibarrola, F. Liberal, I. Taboada, and R. Ortega. Web QoE evaluation in multi-agent networks: validation of ITU-T G. 1030. In *Autonomic and Autonomous Systems, 2009. ICAS'09. Fifth International Conference on*, pages 289–294. IEEE, 2009.
- [Ibarrola'2010] E. Ibarrola, F. Liberal, A. Ferro, and J. Xiao. Quality of Service management for ISPs: A model and implementation methodology based on

- the ITU-T recommendation E.802 framework. *Communications Magazine, IEEE*, 48(2):146–153, 2010.
- [Ikuno'2010] J.C. Ikuno, M. Wrulich, and M. Rupp. System level simulation of LTE networks. In *Proc. 2010 IEEE 71st Vehicular Technology Conference*, Taipei, Taiwan, May 2010.
- [Jacko'2010] P. Jacko. Restless bandits approach to the job scheduling problem and its extensions. In A. B. Piunovskiy, editor, *Modern Trends in Controlled Stochastic Processes: Theory and Applications*, pages 248–267. Luniver Press, United Kingdom, 2010.
- [Jacko-a'2011] P. Jacko. Optimal index rules for single resource allocation to stochastic dynamic competitors. In *Proceedings of the 5th International ICST Conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools*, pages 425–433. ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering), 2011.
- [Jacko-b'2011] P. Jacko. Value of information in optimal flow-level scheduling of users with Markovian time-varying channels. *Performance Evaluation*, 68(11):1022–1036, 2011.
- [Jain'1984] R. Jain, D. Chiu, and W. R. Hawe. *A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer system*. Eastern Research Laboratory, Digital Equipment Corporation, 1984.
- [Khan'2008] S. Khan, S. Thakolsri, E. Steinbach, and W. Kellerer. QoE-based cross-layer optimization for wireless multiuser systems. In *18th ITC Specialist Seminar on Quality of Experience*, 2008.
- [Kim'2012] J. Kim, B. Kim, J. Kim, and Y. H. Bae. Stability of flow-level scheduling with Markovian time-varying channels. *Performance Evaluation*, to appear, 2012.
- [Kleinrock'1976] L. Kleinrock. *Queueing Systems. Volume 2: Computer Applications*. John Wiley&Sons, 1976.
- [Krishnan'2012] S. S. Krishnan and R. K. Sitaraman. Video stream quality impacts viewer behavior: inferring causality using quasi-experimental designs. In *Proceedings of the 2012 ACM conference on Internet measurement conference*, pages 211–224. ACM, 2012.

- [LeCallet'2012] P. Le Callet, S. Möller, and A. Perkis. Qualinet white paper on definitions of Quality of Experience (2012).
- [Massey'2004] W. A. Massey, K.G. Ramakrisluian, M. Aravamudan, and G. Pai. Scheduling algorithms for downlink services in wireless networks: A Markov decision process approach. In *Global Telecommunications Conference, 2004. GLOBECOM'04. IEEE*, volume 6, pages 4038–4042. IEEE, 2004.
- [Meddeb'2010] A. Meddeb. Internet QoS: pieces of the puzzle. *Communications Magazine, IEEE*, 48(1):86–94, 2010.
- [NinoMora'2007] J.Ñiño Mora. Dynamic priority allocation via restless bandit marginal productivity indices. *TOP*, 15(2):161–198, 2007.
- [Osipova'2009] N. Osipova, U. Ayesta, and K. Avrachenkov. Optimal policy for multi-class scheduling in a single server queue. In *Teletraffic Congress, 2009. ITC 21 2009. 21st International*, pages 1–8. IEEE, 2009.
- [Papadimitriou'1987] C.H. Papadimitriou and J.N. Tsitsiklis. The complexity of Markov decision processes. *Mathematics of operations research*, 12(3):441–450, 1987.
- [Papadimitriou'1999] C. H. Papadimitriou and J.Ñ. Tsitsiklis. The complexity of optimal queueing network. *Mathematics of Operations Research*, 24(2):293–305, 1999.
- [Pinedo'2012] M.L. Pinedo. *Scheduling: theory, algorithms, and systems*. Springer, 2012.
- [Poryazov'2011] S. Poryazov and E. Saranova. Overall QoS referencing in telecommunication systems: Some current concepts and open issues, 2011.
- [Puterman'1990] M.L. Puterman. Markov decision processes. *Handbooks in Operations Research and Management Science*, 2:331–434, 1990.
- [Reginald'2011] D.S. Reginald. The dynamics of internet traffic: Self-similarity, self-organization, and complex phenomena. *Advances in Complex Systems*, 14(06):905–949, 2011.
- [Reichl'2011] P. Reichl, B. Tuffin, and R. Schatz. Logarithmic laws in service quality perception: Where microeconomics meets psychophysics and quality of experience. *Telecommunication Systems*, pages 1–14, 2011.
- [Richards'1998] A. Richards, M. Antoniadis, V. Witana, and G. Rogers. Mapping user level QoS from a single parameter. 1998.

- [Sadiq'2009] B. Sadiq, S.-J. Baek, and G. de Veciana. Delay-optimal opportunistic scheduling and approximations: The log rule. In *IEEE INFOCOM*, 2009.
- [Sadiq'2010] B. Sadiq and G. de Veciana. Balancing SRPT prioritization vs opportunistic gain in wireless systems with flow dynamics. In *ITC 22*, 2010.
- [Schrijver'1998] A. Schrijver. *Theory of linear and integer programming*. Wiley, 1998.
- [Sesia'2011] S. Sesia, I. Toufik, and M. Baker. *LTE-The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice*. Wiley, 2011.
- [Stankiewicz'2011] R. Stankiewicz and A. Jajszczyk. A survey of QoE assurance in converged networks. *Computer Networks*, 55(7):1459–1473, 2011.
- [Stolyar'2004] A.L. Stolyar. Maxweight scheduling in a generalized switch: State space collapse and workload minimization in heavy traffic. *Annals of Applied Probability*, 14(1):1–53, 2004.
- [Tassiulas'1993] L. Tassiulas and A. Ephremides. Dynamic server allocation to parallel queues with randomly varying connectivity. *IEEE Transactions on Information Theory*, 39(2):466–478, 1993.
- [Thakolsri'2009] S. Thakolsri, S. Khan, E. Steinbach, and W. Kellerer. QoE-driven cross-layer optimization for high speed downlink packet access. *Journal of Communications*, 4(9):669–680, 2009.
- [Thompson'1997] K. Thompson, G.J. Miller, and R. Wilder. Wide-area Internet traffic patterns and characteristics. *Network, IEEE*, 11(6):10–23, 1997.
- [VanMieghem'1995] J.A. Van Mieghem. Dynamic scheduling with convex delay costs: The generalized $c\mu$ rule. *The Annals of Applied Probability*, pages 809–833, 1995.
- [Visweswaran'2009] V. Visweswaran. Decomposition techniques for MILP: Lagrangian relaxation decomposition techniques for milp: Lagrangian relaxation. In *Encyclopedia of Optimization*, pages 632–638. Springer, 2009.
- [Weber'1990] R. Weber and G. Weiss. On an index policy for restless bandits. *Journal of Applied Probability*, 27(3):637–648, 1990.
- [Weber'1992] R. Weber. On the Gittins index for multiarmed bandits. *The Annals of Applied Probability*, pages 1024–1033, 1992.

- [Whittle'1988] P. Whittle. Restless bandits: Activity allocation in a changing world. *A Celebration of Applied Probability*, J. Gani (Ed.), *Journal of Applied Probability*, 25A:287–298, 1988.
- [Wierman'2011] A. Wierman. Fairness and scheduling in single server queues. *Surveys in Operations Research and Management Science*, 16(1):39–48, 2011.
- [Zhang'2008] Z. Zhang, S. Moola, and E.K.P. Chong. Approximate stochastic dynamic programming for opportunistic fair scheduling in wireless networks. In *Decision and Control, 2008. CDC 2008. 47th IEEE Conference on*, pages 1404–1409. IEEE, 2008.

A. Eranskina

Frogapenak

A.1 1 Proposizioaren frogapena

Atal honetan (5.6) problemarako forma-itxiko Whittle indizea lortzeko garapen matematikoa erakusten da. Horretarako, gure problemarako ondorioztatutako Whittle indizearen adierazpena bera, (5.8), eta guztirako sari eta lan itxaropenen adierazpenak ((5.9) eta (5.10), hurrenez hurren) erabiliko dira.

A.1 Lema. *a eskuratutako zerbitzu orokor batentzat (5.8) adierazpeneko lan eta sari neurrien batukariak, $\sum_{m \in \mathcal{N}} q_m \mathbb{W}_{(a,m)}^{\mathcal{F}}$ eta $\sum_{m \in \mathcal{N}} q_m \mathbb{R}_{(a,m)}^{\mathcal{F}}$, hurrenez hurren, horrelaxe berriatatz daitezke:*

$$\sum_{m \in \mathcal{N}} q_m \mathbb{W}_{(a,m)}^{\mathcal{F}} = \begin{cases} \frac{\sum_{m>t} q_m \mathbb{W}_{(a,m)}^{\mathcal{F}}}{1-\beta+\beta \sum_{m>t} q_m} & \exists (a, m) \in \mathcal{F} \\ 0 & \forall m \quad (a, m) \notin \mathcal{F} \end{cases} \quad (\text{A.1})$$

$$\sum_{m \in \mathcal{N}} q_m \mathbb{R}_{(a,m)}^{\mathcal{F}} = \begin{cases} \frac{-c(1-\sum_{m>t} q_m) + \sum_{m>t} q_m \mathbb{R}_{(a,m)}^{\mathcal{F}}}{1-\beta+\beta \sum_{m>t} q_m} & \exists (a, m) \in \mathcal{F} \\ \frac{-c}{1-\beta} & \forall m \quad (a, m) \notin \mathcal{F} \end{cases} \quad (\text{A.2})$$

Frogapena. Suposatu a eskuratutako zerbitzurako t kanal egoera atalase bat baino handiagoak diren m kanal egoerak aktiboak direla. Hortaz, $\forall m > t$ izanik $(a, m) \in \mathcal{F}$ da, eta (5.10) erabilia:

$$\mathbb{W}_{(a,m)}^{\mathcal{F}} = \beta \sum_{m' \in \mathcal{N}} q_{m'} \mathbb{W}_{(a,m')}^{\mathcal{F}}, \quad m \leq t$$

Ekuazio linealen sistema horren soluzioa honakoa da:

$$\mathbb{W}_{(a,m)}^{\mathcal{F}} = \frac{\beta \sum_{m'>t} q_{m'} \mathbb{W}_{(a,m')}^{\mathcal{F}}}{1-\beta+\beta \sum_{m'>t} q_{m'}}, \quad m \leq t \quad (\text{A.3})$$

$X(t)$ halaxe definitzen badugu

$$X(t) = \frac{\beta}{1-\beta+\beta \sum_{m'>t} q_{m'}} \quad (\text{A.4})$$

(A.3) jarraian adierazten den bezala formula daiteke:

$$\mathbb{W}_{(a,m)}^{\mathcal{F}} = X(t) \sum_{m'>t} q_{m'} \mathbb{W}_{(a,m')}^{\mathcal{F}}, \quad m \leq t \quad (\text{A.5})$$

Bestetik, (A.4) eta (A.5) erabiliz,

$$\begin{aligned} \sum_{m \in \mathcal{N}} q_m \mathbb{W}_{(a,m)}^{\mathcal{F}} &= (1 - \sum_{m>t} q_m) X(t) \sum_{m>t} q_m \mathbb{W}_{(a,m)}^{\mathcal{F}} + \sum_{m>t} q_m \mathbb{W}_{(a,m)}^{\mathcal{F}} = \\ &= \frac{\beta(1 - \sum_{m>t} q_m) (\sum_{m>t} q_m \mathbb{W}_{(a,m)}^{\mathcal{F}}) + (1 - \beta + \beta \sum_{m>t} q_m) (\sum_{m>t} q_m \mathbb{W}_{(a,m)}^{\mathcal{F}})}{1 - \beta + \beta \sum_{m>t} q_m} = \\ &= \frac{\sum_{m>t} q_m \mathbb{W}_{(a,m)}^{\mathcal{F}}}{1 - \beta + \beta \sum_{m>t} q_m} \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

Bestaldetik, $\forall m \ (a, m) \notin \mathcal{F}$ bada, orduan $\sum_{m \in \mathcal{N}} q_m \mathbb{W}_{(a,m)}^{\mathcal{F}} = 0$ da ($\forall m \ \mathbb{W}_{(a,m)}^{\mathcal{F}} = \beta \sum_{m' \in \mathcal{N}} q_{m'} \mathbb{W}_{(a,m')}^{\mathcal{F}}$ ekuazio sistemaren soluzioa).

Era berdintsuan, sarientzat, (4.10) erabilita

$$\mathbb{R}_{(a,m)}^{\mathcal{F}} = -c + \beta \sum_{m' \in \mathcal{N}} q_{m'} \mathbb{R}_{(a,m')}^{\mathcal{R}}, \quad m \leq t \quad (\text{A.7})$$

Ekuazio linealen sistema hori ebatziz ondorengoa lortzen da

$$\mathbb{R}_{(a,m)}^{\mathcal{F}} = \frac{-c + \beta \sum_{m'>t} q_{m'} \mathbb{R}_{(a,m')}^{\mathcal{F}}}{1 - \beta + \beta \sum_{m'>t} q_{m'}}, \quad m \leq t \quad (\text{A.8})$$

(A.8) erabiliz, eta berridatziz

$$\begin{aligned}
\sum_{m \in \mathcal{N}} q_m \mathbb{R}_{(a,m)}^{\mathcal{F}} &= (1 - \sum_{m>t} q_m) \frac{(-c + \sum_{m>t} q_m \mathbb{R}_{(a,m)}^{\mathcal{F}})}{1 - \beta + \beta \sum_{m>t} q_m} + \sum_{m>t} q_m \mathbb{R}_{(a,m)}^{\mathcal{F}} = \\
&= \frac{(1 - \sum_{m>t} q_m)(-c + \beta \sum_{m>t} q_m \mathbb{R}_{(a,m)}^{\mathcal{F}}) + (1 - \beta + \beta \sum_{m>t} q_m)(\sum_{m>t} q_m \mathbb{R}_{(a,m)}^{\mathcal{F}})}{1 - \beta + \beta \sum_{m>t} q_m} = \\
&= \frac{-c(1 - \sum_{m>t} q_m) + \sum_{m>t} q_m \mathbb{R}_{(a,m)}^{\mathcal{F}}}{1 - \beta + \beta \sum_{m>t} q_m} \tag{A.9}
\end{aligned}$$

Bestalde, $\forall m \ (a, m) \notin \mathcal{F}$ bada, orduan $\sum_{m \in \mathcal{N}} q_m \mathbb{R}_{(a,m)}^{\mathcal{F}} = \frac{-c}{1-\beta}$ da ($\forall m \ \mathbb{R}_{(a,m)}^{\mathcal{F}} = -c + \beta \sum_{m' \in \mathcal{N}} q_{m'} \mathbb{R}_{(a,m')}^{\mathcal{F}}$ ekuazio sistemaren soluzioa). \square

A.2 Lema. $t = t_0$ hasierako kanal atalase batentzat, $\mathbb{W}_{(a,m>t)}^{\mathcal{F}}$ eta $\mathbb{R}_{(a,m>t)}^{\mathcal{F}}$ adierazpenak, (A.1) eta (A.2) espresioan agertzen direnak hurrenez hurren, honakoak dira:

$$\begin{aligned}
\mathbb{W}_{(a,m>t)}^{\mathcal{F}} &= 1 + (1 - \mu_{(a,m)})X(t_1) \left[\sum_{m^{(1)}>t_1} q_{m^{(1)}} + \right. \\
&\quad \left. + \sum_{i=1}^{I(a)} \left(\prod_{j=1}^i \sum_{m^{(j)}>t_j} q_{m^{(j)}} (1 - \mu_{(a+r_m + \sum_{k=1}^{j-1} r_{m^{(k)}, m^{(j)}})}) X(t_{j+1}) \right) \sum_{m^{(i+1)}>t_{i+1}} q_{m^{(i+1)}} \right] \tag{A.10}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mathbb{R}_{(a,m>t)}^{\mathcal{F}} &= -c(1 - \mu_{(a,m)}) \left[1 + X(t_1) \left(1 - \sum_{m^{(1)}>t_1} q_{m^{(1)}} + \sum_{m^{(1)}>t_1} q_{m^{(1)}} (1 - \mu_{(a+r_m, m^{(1)})}) \right) \right] + \\
&\quad + (1 - \mu_{(a,m)})X(t_1) \left[\sum_{i=1}^{I(a)} \left(\prod_{j=1}^i \sum_{m^{(j)}>t_j} q_{m^{(j)}} (1 - \mu_{(a+r_m + \sum_{k=1}^{j-1} r_{m^{(k)}, m^{(j)}})}) \cdot \right. \right. \\
&\quad \left. \left. -c \left[1 - \sum_{m^{(i+1)}>t_{i+1}} q_{m^{(i+1)}} + \sum_{m^{(i+1)}>t_{i+1}} q_{m^{(i+1)}} (1 - \mu_{(a+r_m + \sum_{k=1}^i r_{m^{(k)}, m^{(i+1)}})}) \right] \right) \right. \\
&\quad \left. \cdot X(t_{j+1}) \right] \cdot \frac{1}{L(a, i)} \tag{A.11}
\end{aligned}$$

Frogapena. Hasteko, $m > t$ osagaiantzat $\mathbb{W}_{(a,m)}^{\mathcal{F}}$ adierazpena lortzen da. (4.11) espresioaren arabera:

$$\mathbb{W}_{(a,m)}^{\mathcal{F}} = 1 + \beta(1 - \mu_{(a,m)}) \sum_{m' \in \mathcal{N}} q_{m'} \mathbb{W}_{(a+r_m, m')}^{\mathcal{F}}, \quad m > t$$

(A.6) erabiliz,

$$\sum_{m' \in \mathcal{N}} q_{m'} \mathbb{W}_{(a+r_m, m')}^{\mathcal{F}} = \frac{\sum_{m' > t'} q_{m'} \mathbb{W}_{(a+r_m, m')}^{\mathcal{F}}}{1 - \beta + \beta \sum_{m' > t'} q_{m'}}$$

$$\text{non } \forall m' > t' \quad (a + r_m, m') \in \mathcal{F}$$

Beraz,

$$\mathbb{W}_{(a, m)}^{\mathcal{F}} = 1 + \frac{\beta(1 - \mu_{(a, m)}) \sum_{m' > t'} q_{m'} \mathbb{W}_{(a+r_m, m')}^{\mathcal{F}}}{1 - \beta + \beta \sum_{m' > t'} q_{m'}}$$

$$= 1 + (1 - \mu_{(a, m)}) X(t') \sum_{m' > t'} q_{m'} \mathbb{W}_{(a+r_m, m')}^{\mathcal{F}}, \quad m > t$$

Era honetan,

$$\mathbb{W}_{(a, m > t_0)}^{\mathcal{F}} = 1 + (1 - \mu_{(a, m)}) X(t_1) \sum_{m^{(1)} > t_1} q_{m^{(1)}} \mathbb{W}_{(a+r_m, m^{(1)})}^{\mathcal{F}}$$

$$\text{non } \forall m^{(1)} > t_1 \quad (a + r_m, m^{(1)}) \in \mathcal{F}$$

$$\mathbb{W}_{(a+r_m, m^{(1)} > t_1)}^{\mathcal{F}} = 1 + (1 - \mu_{(a+r_m, m^{(1)})}) X(t_2) \sum_{m^{(2)} > t_2} q_{m^{(2)}} \mathbb{W}_{(a+r_m+r_{m^{(1)}}, m^{(2)})}^{\mathcal{F}}$$

$$\text{non } \forall m^{(2)} > t_2 \quad (a + r_m + r_{m^{(1)}}, m^{(2)}) \in \mathcal{F}$$

$$\mathbb{W}_{(a+r_m+r_{m^{(1)}}, m^{(2)} > t_2)}^{\mathcal{F}} = 1 + (1 - \mu_{(a+r_m+r_{m^{(1)}}, m^{(2)})}) X(t_3) \sum_{m^{(3)} > t_3} q_{m^{(3)}} \mathbb{W}_{(a+r_m+r_{m^{(1)}}+r_{m^{(2)}}, m^{(3)})}^{\mathcal{F}}$$

$$\text{non } \forall m^{(3)} > t_3 \quad (a + r_m + r_{m^{(1)}} + r_{m^{(2)}}, m^{(3)}) \in \mathcal{F}$$

...

Errekurtsio hori hurrengo adierazpenetatik gutxienez bat egiazkoa izan arte gertatuko da:

- (i) $\forall m^{(k+2)} \quad (a + r_m + r_{m^{(1)}} + \dots + r_{m^{(k+1)}}), m^{(k+2)} \notin \mathcal{F}$
- (ii) $\forall m^{(k+2)} \quad (a + r_m + r_{m^{(1)}} + \dots + r_{m^{(k+1)}}), m^{(k+2)} \notin \mathcal{S}$
- (iii) $k + 2 \rightarrow \infty$ denean $\beta^{k+2} = 0$ da, zeinak $X(t_{k+2}) = 0$ izatea eragiten duen

eta ondorioz $\mathbb{W}_{(a+r_m+r_{m^{(1)}}+\dots+r_{m^{(k)}}),m^{(k+1)}}^{\mathcal{F}} = 1$ ($k + 2$ iterazioan guztirako lana nulua izateagatik). Beraz, $\mathbb{W}_{(a,m>t_0)}^{\mathcal{F}}$ gaien konputaziorako, hau guztia ondorengoan laburtzen da:

$$\mathbb{W}_{(a,m^{(k)})}^{\mathcal{F}} = \begin{cases} 1 + (1 - \mu_{(a,m^{(k)})} X(t_{k+1}) \sum_{m^{(k+1)}} q_{m^{(k+1)}} \mathbb{W}_{(a+r_{m^{(k)}}),m^{(k+1)}}^{\mathcal{F}} \\ \forall m^{(k)} (a + r_{m^{(k)}}), m^{(k+1)} \in \mathcal{F} \text{ eta } \forall m^{(k)} (a, m^{(k)}) \in \mathcal{F} \text{ badira} \\ 1 \\ \forall m^{(k)} (a, m^{(k)}) \in \mathcal{F}, \text{ eta } \forall m^{(k+1)} (a + r_{m^{(k)}}), m^{(k+1)} \notin \mathcal{F} \\ \text{edo } (a + r_{m^{(k)}}), m^{(k+1)} \notin \mathcal{S} \text{ edo } X(t_{k+1}) = 0 \text{ badira} \end{cases} \quad (\text{A.12})$$

(A.12) adierazpeneko errekurtsioa aplikatuz, $\mathbb{W}_{(a,m>t_0)}^{\mathcal{F}}$ honako era aproposagoan idatz daiteke:

$$\begin{aligned} \mathbb{W}_{(a,m>t_0)}^{\mathcal{F}} &= 1 + (1 - \mu_{(a,m)}) X(t_1) \sum_{m^{(1)}>t_1} q_{m^{(1)}} \left(1 + (1 - \mu_{(a+r_m),m^{(1)}}) X(t_2) \sum_{m^{(2)}>t_2} q_{m^{(2)}} \cdot \right. \\ &\cdot \left(1 + (1 - \mu_{(a+r_m+r_{m^{(1)}}),m^{(2)}}) \cdot X(t_3) \sum_{m^{(3)}>t_3} q_{m^{(3)}} \left(1 + (1 - \mu_{(a+r_m+r_{m^{(1)}}+r_{m^{(2)}}),m^{(3)}}) X(t_4) \cdot \right. \right. \\ &\cdot \left. \left. \sum_{m^{(4)}>t_4} q_{m^{(4)}} \dots \sum_{m^{(k+1)}>t_{k+1}} q_{m^{(k+1)}} \dots \right) \right) \Bigg) = \\ &= 1 + (1 - \mu_{(a,m)}) X(t_1) \sum_{m^{(1)}>t_1} q_{m^{(1)}} + (1 - \mu_{(a,m)}) X(t_1) \left[\sum_{m^{(1)}>t_1} q_{m^{(1)}} ((1 - \mu_{(a+r_m),m^{(1)}}) \cdot \right. \\ &\cdot X(t_2) \sum_{m^{(2)}} q_{m^{(2)}} + \sum_{m^{(1)}>t_1} q_{m^{(1)}} ((1 - \mu_{(a+r_m),m^{(1)}}) X(t_2) \sum_{m^{(2)}>t_2} q_{m^{(2)}} ((1 - \mu_{(a+r_m+r_{m^{(1)}}),m^{(2)}}) \\ &\cdot X(t_3) \sum_{m^{(3)}>t_3} q_{m^{(3)}}) + \sum_{m^{(1)}>t_1} q_{m^{(1)}} ((1 - \mu_{(a+r_m),m^{(1)}}) X(t_2) \sum_{m^{(2)}>t_2} q_{m^{(2)}} ((1 - \mu_{(a+r_m+r_{m^{(1)}}),m^{(2)}}) \cdot \\ &\cdot X(t_3) \sum_{m^{(3)}>t_3} q_{m^{(3)}} ((1 - \mu_{(a+r_m+r_{m^{(1)}}+r_{m^{(2)}}),m^{(3)}}) X(t_4) \cdot \sum_{m^{(4)}>t_4} q_{m^{(4)}})) \Bigg) \\ &\left. \dots \cdot \sum_{m^{(k+1)}>t_{k+1}} q_{m^{(k+1)}} \dots \right) \Bigg] \end{aligned} \quad (\text{A.13})$$

(A.13) manipulatur $\mathbb{W}_{(a,m>t_0)}^{\mathcal{F}}$ modu egokiagoan idatz daiteke:

$$\mathbb{W}_{(a,m>t_0)}^{\mathcal{F}} = 1 + (1 - \mu_{(a,m)})X(t_1) \left[\sum_{m^{(1)}>t_1} q_{m^{(1)}} + \right. \\ \left. + \sum_{i=1}^{I(a)} \left(\prod_{j=1}^i \sum_{m^{(j)}>t_j} q_{m^{(j)}} (1 - \mu_{(a+r_m+\sum_{k=1}^{j-1} r_{m^{(k)},m^{(j)}})}) X(t_{j+1}) \right) \sum_{m^{(i+1)}>t_{i+1}} q_{m^{(i+1)}} \right] \quad (\text{A.14})$$

non $I(a)$ errekurtsioaren jarraipenerako baldintza betetzen den azken iterazioa den.

Era berdintsuan, $\mathbb{W}_{(a,m>t_0)}^{\mathcal{F}}$ espresioa eskuratzeko prozedura erabiliz, $\mathbb{R}_{(a,m>t_0)}^{\mathcal{F}}$ sari osagaien adierazpena lortuko da jarraian. Era honetan, (5.9) espresioaren arabera:

$$\mathbb{R}_{(a,m)}^{\mathcal{F}} = -c(1 - \mu_{(a,m)}) + \beta(1 - \mu_{(a,m)}) \sum_{m' \in \mathcal{N}} q_{m'} \mathbb{R}_{(a+r_m,m')}^{\mathcal{F}}, \quad m > t$$

(A.9) erabiliz

$$\sum_{m' \in \mathcal{N}} q_{m'} \mathbb{R}_{(a+r_m,m')}^{\mathcal{F}} = \frac{-c(1 - \sum_{m'>t} q_{m'}) + \sum_{m'>t} q_{m'} \mathbb{R}_{(a+r_m,m')}^{\mathcal{F}}}{1 - \beta + \beta \sum_{m'>t} q_{m'}} \\ \text{non } \forall m' > t \quad (a + r_m, m' > t) \in \mathcal{F} \quad (\text{A.15})$$

Hortaz, ((A.4) sartuz)

$$\mathbb{R}_{(a,m>t)}^{\mathcal{F}} = -c(1 - \mu_{(a,m)}) + \frac{\beta(1 - \mu_{(a,m)})(-c(1 - \sum_{m'>t} q_{m'}) + \sum_{m'>t} q_{m'} \mathbb{R}_{(a+r_m,m')}^{\mathcal{F}})}{1 - \beta + \beta \sum_{m'>t} q_{m'}} = \\ = -c(1 - \mu_{(a,m)}) + (1 - \mu_{(a,m)})X(t)(-c(1 - \sum_{m'>t} q_{m'}) + \sum_{m'>t} q_{m'} \mathbb{R}_{(a+r_m,m')}^{\mathcal{F}})$$

Modu honetan,

$$\mathbb{R}_{(a,m>t_0)}^{\mathcal{F}} = -c(1 - \mu_{(a,m)}) + (1 - \mu_{(a,m)}) \cdot X(t_1)(-c(1 - \sum_{m^{(1)}>t_1} q_{m^{(1)}}) + \\ + \sum_{m^{(1)}>t_1} q_{m^{(1)}} \mathbb{R}_{(a+r_m,m^{(1)})}^{\mathcal{F}}) \\ \text{non } \forall m^{(1)} > t_1 \quad (a + r_m, m^{(1)}) \in \mathcal{F}$$

$$\begin{aligned} \mathbb{R}_{(a+r_m, m^{(1)} > t_1)}^{\mathcal{F}} &= -c(1 - \mu_{(a+r_m, m^{(1)})}) + (1 - \mu_{(a+r_m, m^{(1)})})X(t_2)(-c(1 - \sum_{m^{(2)} > t_2} q_{m^{(2)}}) + \\ &+ \sum_{m^{(2)} > t_2} q_{m^{(2)}} \mathbb{R}_{(a+r_m+r_{m^{(1)}}, m^{(2)})}^{\mathcal{F}}) \\ \text{non } \forall m^{(2)} > t_2 \quad (a + r_m + r_{m^{(1)}}, m^{(2)}) &\in \mathcal{F} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbb{R}_{(a+r_m+r_{m^{(1)}}, m^{(2)} > t_2)}^{\mathcal{F}} &= -c(1 - \mu_{(a+r_m+r_{m^{(1)}}, m^{(2)})}) + (1 - \mu_{(a+r_m+r_{m^{(1)}}, m^{(2)})})X(t_3) \cdot \\ &\cdot (-c(1 - \sum_{m^{(3)} > t_3} q_{m^{(3)}}) + \sum_{m^{(3)} > t_3} q_{m^{(3)}} \mathbb{R}_{(a+r_m+r_{m^{(1)}}+r_{m^{(2)}}, m^{(3)})}^{\mathcal{F}}) \\ \text{non } \forall m^{(3)} > t_3 \quad (a + r_m + r_{m^{(1)}} + r_{m^{(2)}}, m^{(3)}) &\in \mathcal{F} \end{aligned}$$

...

Errekurtsio hori aurreko hiru adierazpenetatik bat gutxienez egiazkoa izan arte gertatuko da. Ondorioz, $\mathbb{R}_{(a+r_m+r_{m^{(1)}}+\dots+r_{m^{(k)}}, m^{(k+1)})}^{\mathcal{F}} = -c(1 - \mu_{(a+r_m+r_{m^{(1)}}+\dots+r_{m^{(k)}}, m^{(k+1)})})$ da errekurtsioaren bukaera bigarren edota hirugarren deklarazioa betetzen delako izatekotan ($k + 2$ iterazioan guztirako saria nulua izateagatik); bestela, aurreko espresio hori $(1 - \beta)$ faktoreaz zatituta agertuko litzateke ($k + 2$ iterazioan guztirako saria $\frac{-c}{1-\beta}$ izateagatik). Laburbilduz,

$$\mathbb{R}_{(a, m^{(k)})}^{\mathcal{F}} = \begin{cases} -c(1 - \mu_{(a, m^{(k)})}) & + (1 - \mu_{(a, m^{(k)})})X(t_{k+1})(-c(1 - \sum_{m^{(k+1)} > t_1} q_{m^{(k+1)}}) + \\ & + \sum_{m^{(k+1)}} q_{m^{(k+1)}} \mathbb{R}_{(a+r_{m^{(k)}}, m^{(k+1)})}^{\mathcal{F}}) \\ \forall m^{(k)}(a + r_{m^{(k)}}, m^{(k+1)}) \in \mathcal{F} \text{ eta } \forall m^{(k)}(a, m^{(k)}) \in \mathcal{F} \\ -c(1 - \mu_{(a, m^{(k)})}) & \forall m^{(k)}(a, m^{(k)}) \in \mathcal{F}, \text{ eta } \forall m^{(k+1)}(a + r_{m^{(k)}}, m^{(k+1)}) \notin \mathcal{S} \\ & \text{edo } X(t_{k+1}) = 0 \text{ badira} \\ \frac{-c(1 - \mu_{(a, m^{(k)})})}{1-\beta} & \forall m^{(k)}(a, m^{(k)}) \in \mathcal{F}, \text{ eta } \forall m^{(k+1)}(a + r_{m^{(k)}}, m^{(k+1)}) \notin \mathcal{F} \end{cases} \quad (\text{A.16})$$

Bukatzeko, (A.17) manipulatur, sarientzat ondorengo adierazpena lortzen da:

$$\begin{aligned} \mathbb{R}_{(a,m>t_0)}^{\mathcal{F}} &= -c(1 - \mu_{(a,m)})(1 + X(t_1)(1 - \sum_{m^{(1)}>t_1} q_{m^{(1)}} + \sum_{m^{(1)}>t_1} q_{m^{(1)}}(1 - \mu_{(a+r_m, m^{(1)})})) + \\ &+ (1 - \mu_{(a,m)})X(t_1) \left[\sum_{i=1}^{I(a)} \left(\prod_{j=1}^i \sum_{m^{(j)}>t_j} q_{m^{(j)}} (1 - \mu_{(a+r_m + \sum_{k=1}^{j-1} r_{m^{(k)}}, m^{(j)})}) \cdot \right. \right. \\ &\quad \left. \left. -c(1 - \sum_{m^{(i+1)}>t_{i+1}} q_{m^{(i+1)}} + \sum_{m^{(i+1)}>t_{i+1}} q_{m^{(i+1)}}(1 - \mu_{(a+r_m + \sum_{k=1}^i r_{m^{(k)}}, m^{(i+1)})})) \right) \right] \\ &\cdot X(t_{j+1}) \Bigg) \frac{1}{L(a, i)} = \end{aligned} \tag{A.18}$$

non $L(a, i) = 1$ den, $I(a) \forall m^{(i+2)} (a + r_m + \sum_{k=1}^{I(a)+1} r_{m^{(k)}}, m^{(i+2)}) \notin \mathcal{F}$ dela eta gertatzen denean salbu, kasu horretan $L(a, I(a)) = 1 - \beta$ izanik. \square

A.2 1 Teoremaren frogapena

Jarraian, banaketa orokor batentzat eskuratutako (A.14) eta (A.18) adierazpenak erabilita PI indize erregelaren indizearen espresioa ondorioztatzen da. Horretarako, PI politika banaketa esponentzialarentzat lortu delarik, honako kontsiderazioak kontuan hartzen dira:

- (i) $\mu_{(a,m)} = \mu_m$
- (ii) $\forall m > n$ bada $v_n^* < v_m^*$ betetzen da
- (iii) $X(m_k) = X(m > n) = X$ (bigarren kontsiderazioaren ondorioz)
- (iv) $I(a) = \infty$ (bigarren kontsiderazioa dela eta)

Banaketa orokorrerako lortutako Whittle indizearen adierazpen orokorretik, (5.8), PI indizea honakora murrizten da:

$$\begin{aligned} \text{PI} = v_n^{\mathcal{F}} &= v_{(a,n)}^{\mathcal{F}} = \frac{c\mu_n + \beta(1 - \mu_n) \sum_{m \in \mathcal{N}} q_m \mathbb{R}_m^{\mathcal{F}} - \beta \sum_{m \in \mathcal{N}} q_m \mathbb{R}_m^{\mathcal{F}}}{1 + \beta(1 - \mu_n) \sum_{m \in \mathcal{N}} q_m \mathbb{W}_m^{\mathcal{F}} - \beta \sum_{m \in \mathcal{N}} q_m \mathbb{W}_m^{\mathcal{F}}} \\ &= \frac{\mu_n(c - \beta \sum_{m \in \mathcal{N}} q_m \mathbb{R}_m^{\mathcal{F}})}{1 - \beta\mu_n \sum_{m \in \mathcal{N}} q_m \mathbb{W}_m^{\mathcal{F}}} \end{aligned} \tag{A.19}$$

Alde batetik, lan osagaiei dagokienez, (A.14) erabiliz,

$$\begin{aligned}
\mathbb{W}_{(m,m>n)}^{\mathcal{F}} &= 1 + (1 - \mu_m)X \sum_{m>n} q_m + \\
&(1 - \mu_m)X \left[\sum_{i=1}^{\infty} \left(\prod_{j=1}^i \left(\sum_{m>n} q_m (1 - \mu_m) X \right) \right) \sum_{m>n} q_m \right] = \\
&= 1 + (1 - \mu_m)X \sum_{m>n} q_m + (1 - \mu_m)X \sum_{m>n} q_m \left[\sum_{i=1}^{\infty} \left(X \sum_{m>n} q_m (1 - \mu_m) \right)^i \right] = \\
&= 1 + (1 - \mu_m)X \sum_{m>n} q_m \left[\sum_{i=0}^{\infty} \left(X \sum_{m>n} q_m (1 - \mu_m) \right)^i \right] = \\
&= 1 + \frac{(1 - \mu_m)X}{1 - X \sum_{m>n} q_m (1 - \mu_m)} = 1 + \frac{\frac{(1 - \mu_m)\beta \sum_{m>n} q_m}{1 - \beta + \beta \sum_{m>n} q_m}}{1 - \frac{\beta \sum_{m>n} q_m (1 - \mu_m)}{1 - \beta + \beta \sum_{m>n} q_m}} = \\
&= 1 + \frac{\frac{(1 - \mu_m)\beta \sum_{m>n} q_m}{1 - \beta + \beta \sum_{m>n} q_m}}{\frac{1 - \beta + \beta \sum_{m>n} q_m - \beta \sum_{m>n} q_m + \beta \sum_{m>n} q_m \mu_m}{1 - \beta + \beta \sum_{m>n} q_m}} = 1 + \frac{(1 - \mu_m)\beta \sum_{m>n} q_m}{1 - \beta + \beta \sum_{m>n} q_m \mu_m} = \\
&= \frac{1 - \beta + \beta \sum_{m>n} q_m + \beta \sum_{m>n} q_m \mu_m - \mu_m \beta \sum_{m>n} q_m}{1 - \beta + \beta \sum_{m>n} q_m \mu_m} \tag{A.20}
\end{aligned}$$

Ohartu $(X(1 - \mu_m))^\infty = 0$ dela $(X(\beta))^\infty = 0$ izategatik.

(A.6) eta (A.20) erabiliz,

$$\begin{aligned}
\sum_{m \in \mathcal{N}} q_m \cdot \mathbb{W}_m^{\mathcal{F}} &= \frac{\sum_{m>n} q_m \mathbb{W}^{\mathcal{F}}}{1 - \beta + \beta \sum_{m>n} q_m} = \\
&= \frac{\sum_{m<n} q_m (1 - \beta + \beta \sum_{m>n} q_m) + \sum_{m<n} q_m (\beta \sum_{m>n} q_m \mu_m) - \sum_{m<n} q_m (\mu_m \beta \sum_{m>n} q_m)}{(1 - \beta + \beta \sum_{m>n} q_m)(1 - \beta + \beta \sum_{m>n} q_m \mu_m)} = \\
&= \frac{\sum_{m>n} q_m}{1 - \beta + \beta \sum_{m>n} q_m \mu_m} \tag{A.21}
\end{aligned}$$

Bestaldetik, era berdintsuan, (A.18) erabilita, sari osagaiantzat:

$$\begin{aligned}
\mathbb{R}_{(m,m>n)}^{\mathcal{F}} &= -c(1 - \mu_m)(1 + X(1 - \sum_{m>n} q_m + \sum_{m>n} q_m(1 - \mu_m))) + \\
&+ (1 - \mu_m)X \left[\sum_{i=1}^{\infty} \left(\prod_{j=1}^i \sum_{m>n} q_m(1 - \mu_m)X \right) \cdot \right. \\
&\cdot \left. \left(-c(1 - \sum_{m>n} q_m + \sum_{m>n} q_m(1 - \mu_m)) \right) \right] = \\
&= -c(1 - \mu_m) \left[1 + X(1 - \sum_{m>n} q_m + \sum_{m>n} q_m(1 - \mu_m)) \left(\frac{1}{1 - X \sum_{m>n} q_m(1 - \mu_m)} \right) \right] = \\
&= -c(1 - \mu_m) \left[1 + \frac{\beta(1 - \sum_{m>n} q_m \mu_m)}{(1 - \beta + \beta \sum_{m>n} q_m) \left(1 - \frac{\beta \sum_{m>n} q_m(1 - \mu_m)}{1 - \beta + \beta \sum_{m>n} q_m} \right)} \right] = \\
&= -c(1 - \mu_m) \left[1 + \frac{\beta(1 - \sum_{m>n} q_m \mu_m)}{(1 - \beta + \beta \sum_{m>n} q_m) \frac{1 - \beta + \beta \sum_{m>n} q_m - \beta \sum_{m>n} q_m + \beta \sum_{m>n} q_m \mu_m}{1 - \beta + \beta \sum_{m>n} q_m}} \right] = \\
&= \frac{-c(1 - \mu_m)}{1 - \beta + \beta \sum_{m>n} q_m \mu_m}
\end{aligned} \tag{A.22}$$

(A.22) erabiliz eta (A.9) adierazpenaren bidez,

$$\begin{aligned}
\sum_{m \in \mathcal{N}} q_m \mathbb{R}_m^{\mathcal{F}} &= \frac{-c(1 - \sum_{m>n} q_m) + \sum_{m>n} q_m \mathbb{R}_m^{\mathcal{F}}}{1 - \beta + \beta \sum_{m>n} q_m} = \\
&= \frac{-c \left[\left(1 - \sum_{m>n} q_m \right) + \frac{\sum_{m>n} q_m(1 - \mu_m)}{1 - \beta + \beta \sum_{m>n} q_m} \right]}{1 - \beta + \beta \sum_{m>n} q_m} = \\
&= \frac{-c \left[\left(1 - \sum_{m>n} q_m \right) (1 - \beta + \beta \sum_{m>n} q_m \mu_m) + \sum_{m>n} q_m(1 - \mu_m) \right]}{(1 - \beta + \beta \sum_{m>n} q_m) (1 - \beta + \beta \sum_{m>n} q_m \mu_m)} = \\
&= \frac{-c(1 - \beta + \beta \sum_{m>n} q_m) (1 - \sum_{m>n} q_m \mu_m)}{(1 - \beta + \beta \sum_{m>n} q_m) (1 - \beta + \beta \sum_{m>n} q_m \mu_m)} = \frac{c(-1 + \sum_{m>n} q_m \mu_m)}{1 - \beta + \beta \sum_{m>n} q_m \mu_m}
\end{aligned} \tag{A.23}$$

(A.21) eta (A.23) espresioak (A.19) adierazpenean ordezkatur,

$$\begin{aligned} \text{PI} &= \frac{\mu_n \left[c - \beta c \frac{-1 + \sum_{m>n} q_m \mu_m}{1 - \beta + \beta \sum_{m>n} q_m \mu_m} \right]}{1 - \frac{\beta \mu_n \sum_{m>n} q_m}{1 - \beta + \beta \sum_{m>n} q_m \mu_m}} = \\ &= \frac{c \mu_n (1 - \beta + \beta \sum_{m>n} q_m \mu_m - \beta (-1 + \sum_{m>n} q_m \mu_m))}{1 - \beta + \beta \sum_{m>n} q_m \mu_m - \beta \mu_n \sum_{m>n} q_m} = \frac{c \mu_n}{1 - \beta + \beta \sum_{m>n} q_m (\mu_m - \mu_n)} \end{aligned} \quad (\text{A.24})$$

A.3 3 Proposizioaren frogapena

A.3 Lema. Demagun $(a, m \leq n) \cup (a + r_n, m \leq n)$ egoerak pasiboak eta $(a, m > n) \cup (a + r_n, m > n)$ egoerak aktiboak direla, eta

$$\tilde{v}_{(a,n)}^* = \frac{\mu_{(a,n)}(c - \beta R_a)}{1 - \beta \mu_{(a,n)} W_a} \quad (\text{A.25})$$

Bestalde, edozein $l = 1, 2, \dots, N$ balioentzat $R_a = \sum_m q_m R_{(a,m)} \approx \sum_m q_m R_{(a+r_l,m)}$ eta $W_a = \sum_m q_m W_{(a,m)} \approx \sum_m q_m W_{(a+r_l,m)}$ betetzen bada, deskontu gabeko kasuan:

$$\tilde{v}_{(a,n)}^* = \frac{c \mu_{(a,n)}}{\sum_{m>n} q_m (\mu_{(a,m)} - \mu_{(a,n)})} \quad (\text{A.26})$$

Frogapena. Lan elementuei dagokienez, (5.10) erabiliz:

$$\begin{aligned} W_{(a,m \leq n)} &= \beta W_a \\ W_{(a,m > n)} &= 1 + \beta(1 - \mu_{(a,m)}) \sum_m q'_m W_{(a+r_m,m')} = 1 + \beta(1 - \mu_{(a,m)}) W_a \end{aligned} \quad (\text{A.27})$$

Eta hortaz, (A.27) adierazpenak erabilita,

$$W_a = (1 - \sum_{m>n} q_m) \beta W_a + \sum_{m>n} q_m (1 + \beta(1 - \mu_{(a,m)})) W_a$$

W_a bakanduz,

$$W_a = \frac{\sum_{m>n} q_m}{1 - \beta + \beta \sum_{m>n} q_m \mu_{(a,m)}} \quad (\text{A.28})$$

Era berdintsuan, sari elementuentzat, (5.9) erabilia:

$$\begin{aligned}
R_{(a,m \leq n)} &= -c + \beta R_a \\
R_{(a,m > n)} &= -c(1 - \mu_{(a,m)}) + \beta(1 - \mu_{(a,m)}) \sum_m q'_m R_{(a+r_m, m')} = \\
&= -c(1 - \mu_{(a,m)}) + \beta(1 - \mu_{(a,m)}) R_a
\end{aligned} \tag{A.29}$$

Eta beraz, (A.29) espresioak erabilia,

$$R_a = (1 - \sum_{m>n} q_m)(-c + \beta R_a) + \sum_{m>n} q_m(-c(1 - \mu_{(a,m)}) + \beta(1 - \mu_{(a,m)}) R_a)$$

R_a bakanduz,

$$R_a = \frac{-c(1 - \sum_{m>n} q_m \mu_{(a,m)})}{1 - \beta + \beta \sum_{m>n} q_m \mu_{(a,m)}} \tag{A.30}$$

W_a eta R_a espresioak, (A.28) eta (A.30) hurrenez hurren, (A.25) adierazpenean ordezkatzuz eta sinplifikatuz,

$$\begin{aligned}
\tilde{v}_{(a,d)}^* &= \frac{c(-1 + \sum_{m>n} q_m \mu_{(a,m)})}{c\mu_{(a,n)} - \beta\mu_{(a,n)} \frac{\sum_{m>n} q_m \mu_{(a,m)}}{1 - \beta + \beta \sum_{m>n} q_m \mu_{(a,m)}}} = \\
&= \frac{\sum_{m>n} q_m}{1 - \beta\mu_{(a,n)} \frac{\sum_{m>n} q_m \mu_{(a,m)}}{1 - \beta + \beta \sum_{m>n} q_m \mu_{(a,m)}}} = \\
&= \frac{c\mu_{(a,n)}(1 - \beta + \beta \sum_{m>n} q_m \mu_{(a,m)}) - \beta\mu_{(a,n)}c(-1 + \sum_{m>n} q_m \mu_{(a,m)})}{1 - \beta + \beta \sum_{m>n} q_m \mu_{(a,m)} - \beta\mu_{(a,n)} \sum_{m>n} q_m} = \\
&= \frac{c\mu_{(a,n)}}{1 - \beta + \beta \sum_{m>n} q_m (\mu_{(a,m)} - \mu_{(a,n)})} \tag{A.31}
\end{aligned}$$

Eta beraz, $\beta = 1$ kasuan, (A.31) adierazpena (A.26) da.

□

A.4 4 Proposizioaren frogapena

A.4 Lema. Demagun $(a, d + 1, m \leq n) \cup (a + r_n, d + 1m \leq n)$ egoerak pasiboak eta $(a, d + 1, m > n) \cup (a + r_n, d + 1, m > n)$ egoerak aktiboak direla, eta

$$\tilde{v}_{(a,d,n)}^* = \frac{\beta\mu_{(a,n)}(\widehat{MOS}(d + 1) - R_{ad})}{1 - \beta\mu_{(a,n)}W_{ad}} \tag{A.32}$$

Horrekin batera, $R_{ad} = \sum_m q_m R_{(a,d,m)} \approx \sum_m q_m R_{(a+r_l,d+1,m)}$ eta $W_{ad} = \sum_m q_m W_{(a,d,m)} \approx \sum_m q_m W_{(a+r_l,d+1,m)}$ betetzen dela suposatzen bada edozein $l = 1, 2, \dots, N$ balioentzat, deskontu gabeko kasuan :

$$\tilde{v}_{(a,d,n)}^* = \lim_{\beta \rightarrow 1} \frac{\beta \mu_{(a,n)} \cdot \widehat{\text{MOS}}(d+1)(1-\beta)}{1-\beta + \beta \sum_{m>n} q_m (\mu_{(a,m)} - \mu_{(a,n)})} \quad (\text{A.33})$$

Frogapena. Lan elementuei dagokionez, (5.22) erabilita:

$$\begin{aligned} W_{(a,d,m \leq n)} &= \beta \sum_m q'_m W_{(a,d+1,m')} = \beta W_{ad} \\ W_{(a,d,m > n)} &= 1 + \beta(1 - \mu_{(a,m)}) \sum_m q'_m W_{(a+r_m,d+1,m')} = 1 + \beta(1 - \mu_{(a,m)}) W_{ad} \end{aligned} \quad (\text{A.34})$$

Eta (A.34) adierazpenak erabiliz,

$$W_{ad} = (1 - \sum_{m>n} q_m) \beta W_{ad} + \sum_{m>n} q_m (1 + \beta(1 - \mu_{(a,m)})) W_{ad}$$

Modu honetan, W_{ad} bakantzen bada,

$$W_{ad} = \frac{\sum_{m>n} q_m}{1 - \beta + \beta \sum_{m>n} q_m \mu_{(a,m)}} \quad (\text{A.35})$$

Era berdintsuan, sari elementuentzat, (5.21) erabiliz:

$$\begin{aligned} R_{(a,d,m \leq n)} &= \beta \sum_m q'_m R_{(a,d+1,m')} = \beta R_{ad} \\ R_{(a,d,m > n)} &= \beta [(1 - \mu_{(a,m)}) \sum_m q'_m R_{(a+r_m,m')} + \mu_{(a,m)} \cdot \widehat{\text{MOS}}(d+1)] = \\ &= \beta [(1 - \mu_{(a,m)}) R_{ad} + \mu_{(a,m)} \cdot \widehat{\text{MOS}}(d+1)] \end{aligned} \quad (\text{A.36})$$

Eta hortaz, (A.36) espresioak erabilita,

$$R_{ad} = (1 - \sum_{m>n} q_m) \beta R_{ad} + \sum_{m>n} q_m (\beta [(1 - \mu_{(a,m)}) R_{ad} + \mu_{(a,m)} \cdot \widehat{\text{MOS}}(d+1)])$$

R_{ad} bakanduz,

$$R_{ad} = \frac{\beta \sum_{m>n} q_m \mu_{(a,m)} \widehat{\text{MOS}}(d+1)}{1 - \beta + \beta \sum_{m>n} q_m \mu_{(a,m)}} \quad (\text{A.37})$$

W_{ad} eta R_{ad} adierazpenak, (A.35) eta (A.37) hurrenez hurren, (A.32) adierazpenean ordezkatur eta sinplifikatur honakoa lortzen da:

$$\begin{aligned} \tilde{v}_{(a,d,n)}^* &= \frac{\beta \mu_{(a,n)} (\widehat{\text{MOS}}(d+1) - \frac{\beta \sum_{m>n} q_m \mu_{(a,m)} \widehat{\text{MOS}}(d+1)}{1 - \beta + \beta \sum_{m>n} q_m \mu_{(a,m)}})}{1 - \beta \mu_{(a,n)} \frac{\sum_{m>n} q_m}{1 - \beta + \beta \sum_{m>n} q_m \mu_{(a,m)}}} = \\ &= \frac{\beta \mu_{(a,n)} (\widehat{\text{MOS}}(d+1) (1 - \beta + \beta \sum_{m>n} q_m \mu_{(a,m)}) - \beta \sum_{m>n} q_m \mu_{(a,m)} \widehat{\text{MOS}}(d+1))}{1 - \beta + \beta \sum_{m>n} q_m \mu_{(a,m)} - \beta \mu_{(a,n)} \sum_{m>n} q_m} = \\ &= \frac{\beta \mu_{(a,n)} \cdot \widehat{\text{MOS}}(d+1) (1 - \beta)}{1 - \beta + \beta \sum_{m>n} q_m (\mu_{(a,m)} - \mu_{(a,n)})} \end{aligned} \quad (\text{A.38})$$

Eta beraz, deskontu gabeko kasurako, (A.38) adierazpenaren $\beta \rightarrow 1$ limitea (A.33) da. □

Glosategia

MDP	Markov Decision Process
QoE	Quality of Experience
QoS	Quality of Service
MOS	Mean Opinion Score
AG	Adaptive-Greedy
GM	Gittins MOS
WM	Whittle MOS
GWM	Gittins-Whittle MOS
PI	Potential Improvement
ASPI	Attained Service PI
ASPIM	ASPI MOS
cAS_{μ}	cost and Attained Service dependant μ
$DcAS_{\mu}$	Delay dependant cAS_{μ}
RR	Round Robin
MR	Max Rate
PF	Proportional Fair
CQI	Channel Quality Indicator
TTI	Transmission Time Interval
DHR	Decreasing Hazard Rate

GHR	Generalized Hazard Rate
DGHR	Decreasing GHR
PDF	Probabilty Density Function
CDF	Cumulative Distribution Function
CCDF	Complementary CDF
AId	Agertoki Identifikatzailea
LTE	Long Term Evolution
ITU-T	International Telecommunication Union Standardization Sector
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
PDF	Portable Document Format
GOP	Group Of Pictures