

Графын онолд суурилсан дулааны хангамжийн сүлжээний топологийн загварчлал ба гидравлик горимын тооцоолол

Халзангийн ЦОЛМОН¹, Сэрээтэрийн БАТМӨНХ², Хангайн ЭНХБАЯР³

¹Монгол Улс, Улаанбаатар Шинжлэх ухаан, технологийн их сургууль, Эрчим хүчний инженерчлэлийн сургууль, Дулаан хангамж автоматжуулалтын тэнхим

²Монгол Улс, Улаанбаатар, Шинжлэх ухаан, технологийн их сургууль, Эрчим хүчний инженерчлэлийн сургууль, Дулааны цахилгаан станцын тэнхим

³Монгол Улс, Улаанбаатар, Шинжлэх ухаан, технологийн их сургууль, Хэрэглээний шинжлэх ухааны сургууль, Математикийн тэнхим

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: kh.solmon@must.edu.mn¹

Хураангуй: Энэхүү судалгааны ажлаар Улаанбаатар хотын төвлөрсөн дулааны хангамжийн сүлжээний топологийн загварчлал болон гидравлик горимын тооцооллыг хавтгайн графын онолын хүрээнд гүйцэтгэсэн. Сүлжээг чиглэлтэй граф $G = (V, E)$ хэлбэрээр илэрхийлж, холбоосын матриц болон хүрээний матриц байгуулан Кирхгофын хуулиудад суурилсан тэгшитгэлийн системийг тооцоолов. Хан-Уул дүүргийн дулааны сүлжээний жишээн дээр Hardy-Cross давталтын аргаар 3GDH (110/70°C) ба 4GDH (65/35°C) горимын гидравлик тооцоолол хийж, сүлжээний оновчлолын хувилбаруудыг харьцуулсан. Тооцооллын үр дүнд тусдаа шугамын хувилбар нь насосны нийт чадлыг 44.1%-иар бууруулж, 4GDH шилжилтэд бүрэн нийцтэй болохыг тогтоосон.

Түлхүүр үг: графын онол, хавтгайн граф, холбоосын матриц, гидравлик тооцоолол, Hardy-Cross, дулааны хангамжийн сүлжээ

I. УДИРТГАЛ

Улаанбаатар хот нь дэлхийн хамгийн хүйтэн нийслэлүүдийн нэг бөгөөд өвлийн гадна агаарын температур -40°C хүртэл буурдаг. Хотын 60 гаруй хувийн хүн амыг хангадаг төвлөрсөн дулааны хангамжийн систем (ТДХС) нь 370 км шугам хоолой, 15,000 гаруй хэрэглэгчтэй нарийн төвөгтэй сүлжээ юм. Одоогийн систем нь 2-р үеийн технологид хамаарах $130/70^{\circ}\text{C}$ горимтой, дулааны алдагдал $\sim 17\%$ байгаа нь олон улсын стандарт 6–9%-аас нэлээд өндөр бөгөөд хоолойн 25%-иас дээш хэсэг хуучирсан байна. Уламжлалт гидравлик тооцооны аргууд (Hardy-Cross, эквивалент эсэргүүцлийн арга) нь ийм томоохон сүлжээнд тооцооллын хурд, нарийвчлал, топологийн илэрхийллийн хувьд хязгаарлагдмал байдаг. Todini, Pilati (1988) нарын боловсруулсан Глобал градиент алгоритм (ГГА) нь сүлжээний топологийг холбоосын матрицаар илэрхийлж, Ньютон-Рафсоны аргаар бүх тэгшитгэлийг зэрэг шийддэг учир том сүлжээнд илүү үр дүнтэй [2]. Lund нар (2014) 4-р үеийн дулааны хангамжийн системийн (4GDH) үзэл баримтлалыг томъёолж, өгөх усны температурыг $50\text{--}70^{\circ}\text{C}$ хүртэл бууруулснаар дамжуулалтын алдагдлыг ~ 2 дахин бууруулах боломжтойг харуулсан [3]. Гэвч ΔT буурахад зарцуулалтын хурд нэмэгдэж, даралтын алдагдал ~ 2.8 дахин өсдөг тул Улаанбаатарын нөхцөлд шууд шилжих нь гидравлик хүндрэлтэй. Иймээс энэхүү судалгаанд хавтгайн графын онол дээр суурилсан гидравлик горимын тооцооллыг Улаанбаатар хотын ТДХС-д хэрэглэж, одоогийн горимыг загварчлахын зэрэгцээ бага температурын горимд шат дараалан шилжих боломж, түүний гидравлик нөлөөллийг тооцоолохыг зорилоо. Хан-Уул дүүрэг нь нийт дулааны ачааллын 29.0% (830.6 Гкал/цаг)-ийг эзэлж, эх үүсвэрээс алслагдсан, өндөршлийн зөрүүтэй

нөхцөлтэй тул тооцооны жишээ болгон сонгож зураг 1-д үзүүлэв.

II. ОНОЛЫН ХЭСЭГ

A. Графын онолын үндсэн ойлголт

Граф $G = (V, E)$ нь зангилааны олонлог V болон ирмэгийн олонлог E -ээс бүрддэг математик бүтэц юм. Дулааны хангамжийн сүлжээнд зангилаа нь эх үүсвэр (ДЦС, ДС), салаалалтын цэг, хэрэглэгч (дулааны дэд станц) болох бөгөөд ирмэг нь шугам хоолойг илэрхийлнэ. Чиглэлтэй графын (directed graph) хувьд ирмэг бүрд дулаан зөөгч шингэний урсгалын чиглэлийг тогтооно.

B. Сүлжээний топологийн матриц загварчлал

Холбоосын матриц A нь $n \times m$ хэмжээтэй матриц бөгөөд n — зангилааны тоо, m — ирмэгийн тоог илэрхийлэх ба зангилаа ба ирмэгийн хоорондын холбоосыг тодорхойлно: $A_{ij} = +1$ бол ирмэг j зангилаа i -ээс гарна; -1 бол ирмэг j зангилаа i -д орно; 0 бол холбогдоогүй байна.

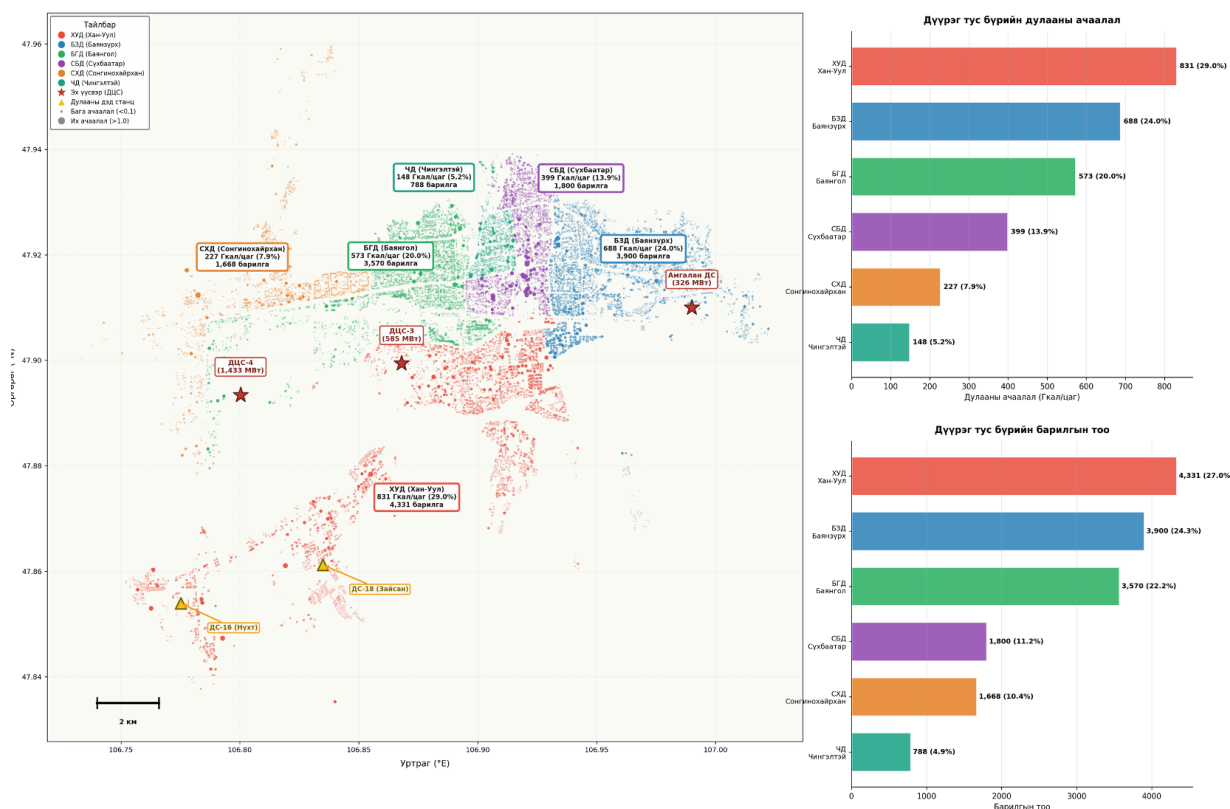
Хүрээний матриц B нь $l \times m$ хэмжээтэй бөгөөд бие даасан хүрээний тоо $l = m - n + 1$ байна. Дулааны сүлжээний гидравлик тэнцвэрийн нөхцөлийг Кирхгофын хоёр хуулиар илэрхийлнэ. Кирхгофын I хууль зангилааны тэнцвэртэй нөхцөлийг тодорхойлох бол II хууль хүрээний тэнцвэртэй нөхцөлийг тус тус илэрхийлнэ.

$$A \cdot q = Q \quad (1)$$

Энд: q — ирмэг дэх иугмын зарцуулалтын вектор (m^3/c), Q — зангилаан дах хэрэглэгчийн зарцуулалтын вектор,

$$B \cdot \Delta P = 0 \quad (2)$$

ΔP — ирмэг дэх даралтын уналтын вектор.



Зураг 1. Улаанбаатар хотын дулааны ачаалалын тархалт, дүүргүүдийн дулааны ачаалалын хуваарилалт

Хоолой тус бүрийн даралтын уналтыг Дарси-Вейсбахийн тэгшитгэл (3) аар тодорхойлно.

$$\Delta P_j = S_j \cdot Q_j \cdot |Q_j|, \quad (3)$$

$S_j = 8 \cdot \lambda_j \cdot L_j / (\pi^2 \cdot d_j^5 \cdot \rho)$ тодорхойлно.

Энд S_j — j -р шугмын гидравлик эсэргүүцэл, λ_j — Дарсийн үрэлтийн коэффициент, L_j — хоолойн урт, d_j — дотоод диаметр, ρ — усны нягт.

Гадна агаарын температур -40°C , маш хүйтэн уур амьсгалын нөхцөлд буцах усны температур $40-50^\circ\text{C}$, өгөх усны температур $130-150^\circ\text{C}$ байдаг нь усны физик шинж чанарт нөлөөлдөг.

C. Огтлолцсон шугам ба хуурмаг зангилаа

Бодит дулааны сүлжээнд шугам хоолойнууд газар доогуур олон цэгт огтлолцон өнгөрдөг. Графын онолоор бол ийм граф нь хавтгайн бус болно. Үүнийг хавтгайн сүлжээ болгохын тулд огтлолцох цэг бүрд хуурмаг зангилаа нэмэх явдал юм. Хуурмаг зангилаа нь хэрэглэгчийн зарцуулалт $q = 0$, даралтын уналт $\Delta P = 0$ байна.

II. СУДАЛГААНЫ АРГА ЗҮЙ

A. Судалгааны объект

Судалгааны объект нь Улаанбаатар хотын ТДХС бөгөөд 6 дүүрэг, 134 бүсийг хамарсан нийт 2,865.5 Гкал/цаг дулааны ачаалалтай сүлжээ юм. Гидравлик тооцооллыг тодорхой болгох үүднээс Хан-Уул дүүргийн дулааны сүлжээг жишээ болгон сонгосон. Тус дүүрэг нь хотын өмнөд хэсэгт байрлах, 9 дулааны дэд дүүргээр 958.3 МВт ачааллыг хангах

бөгөөд ДЦС-4 (60%) ба ДЦС-3 (40%) эх үүсвэрүүдээс хангагдах нөхцөлөөр тооцоолов.

B. Хан-Уул дүүргийн дулааны дэд дүүргүүд

Хан-Уул дүүрэгт 9 дулааны дэд станц байрлах бөгөөд ДС-18 нь Зайсан бүсэд $h=1,400$ м болон ДС-16 нь Нүхт бүсэд $h=1,380$ м байгаа нь эх үүсвэрээс хамгийн их өндөршлийн зөрүүтэй, алс байрлалтай зангилаанууд юм.

ХАН-УУЛ ДҮҮРГИЙН ДУЛААНЫ ДЭД СТАНЦУУДЫН МЭДЭЭЛЭЛ
I-P ХҮСНЭГТ

ДС	Q, МВт	Барилга	Өргөрөг, °N	Уртраг, °E	h, м	Δh, м
ДС-5	115.5	584	47.8898	106.8675	1,340	0
ДС-9	66.2	425	47.8897	106.9056	1,340	0
ДС-10	118.1	900	47.9110	106.8597	1,343	3
ДС-13	105.0	403	47.9032	106.9017	1,342	2
ДС-20	82.1	455	47.8954	106.8886	1,340	0
ДС-2	113.8	468	47.8965	106.9163	1,341	1
ДС-21	110.9	743	47.8820	106.9235	1,360	20
ДС-18	132.7	780	47.8612	106.8349	1,400	50
ДС-16	114.0	482	47.8539	106.7752	1,380	30

Нийт ачаалал: 958.3 МВт, Нийт барилга: 5,240

С. Тооцооллын арга зүй

Тооцооллыг дараах дарааллаар гүйцэтгэв.

1. Сүлжээг чиглэлтэй граф $G = (V, E)$ хэлбэрээр загварчилж, зангилааны координат, хоолойн урт (WGS84, 1.15 муруйлтын коэффициенттэй)-ыг тодорхойлов.

2. Графын хавтгайн эсэхийг Куратовскийн теоремоор шалгаж, огтлолцсон шугамд виртуал зангилаа нэмэв.

3. Холбоосын матриц $A (n \times m)$ болон хүрээний матриц $B (1 \times m)$ байгуулав.

4. Хоолойн диаметрыг зорилгот хурдаас тодорхойлж, магистраль: 2.0 м/с, салаа: 1.5 м/с байх,

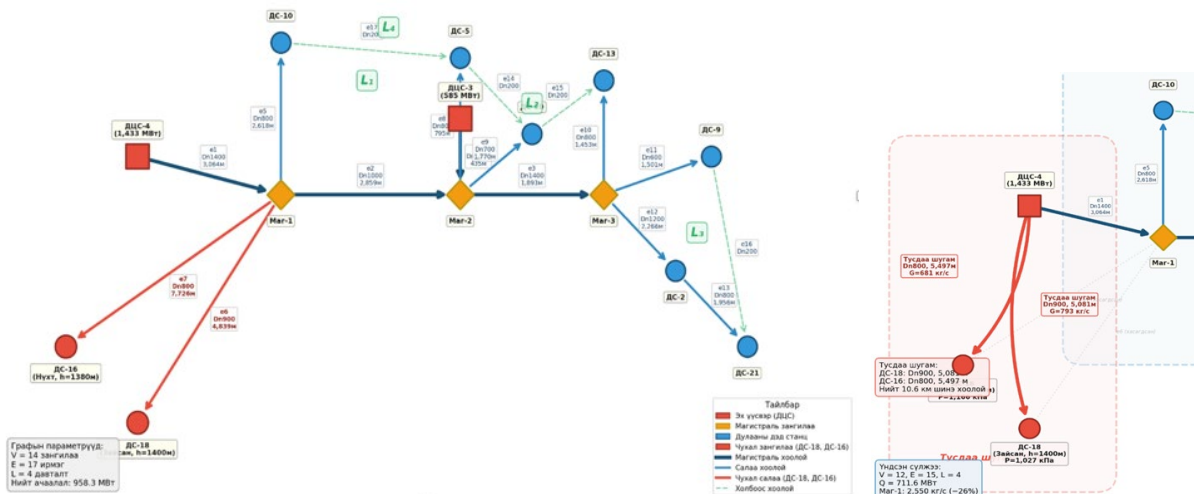
Colebrook-White тэгшитгэлээр үрэлтийн коэффициент λ -г давтан тооцоолов.

5. Hardy-Cross давталтын аргаар зарцуулалтын тэнцвэрт утгыг олж ($\max|\Delta G| < 0.01$ кг/с, 8 давталт), BFS алгоритмаар зангилааны даралтыг тооцоолов.

3.4. Харьцуулсан хувилбарууд

Хувилбар А: Нийт 9 дулааны дэд дүүргийг нэг магистраль сүлжээгээр хангах, графын параметрууд: $V = 14$ зангилаа, $E = 17$ хоолой, $L = 4$ давталт байна.

Хувилбар А-ийн сүлжээний графын топологийг Зураг 2-т үзүүлэв. Эх үүсвэрүүд (ДЦС-4, ДЦС-3), магистраль зангилаанууд (Маг-1, Маг-2, Маг-3), болон 9 дулааны дэд станцын хоорондох холболтыг чиглэлтэй графын ирмэгүүдээр дүрсэлсэн бөгөөд 4 тусдаа давталтыг (L_1-L_4) тодорхойлсон.



Зураг 2. Хувилбар А: Нэгдсэн сүлжээний графын топологи ($V = 14, E = 17, L = 4$), Хувилбар Б: Тусдаа шугамтай сүлжээний графын топологи (Үндсэн: $V = 12, E = 15, L = 4$ + Тусдаа: 2 шугам)

Хувилбар Б (Тусдаа шугам): ДС-18 ба ДС-16-ийг ДЦС-4-өөс шууд тусдаа хоолойгоор хангана. Үндсэн сүлжээ: $V = 12, E = 15, L = 4$. Тусдаа шугам: ДЦС-4→ДС-18 (5,081 м), ДЦС-4→ДС-16 (5,497 м).

Хувилбар Б-ийн тусдаа шугамтай сүлжээний графын топологийг Зураг 3-т үзүүлэв. ДС-18 ба ДС-16-ыг ДЦС-4-өөс шууд тусдаа хоолойгоор хангаснаар үндсэн магистраль сүлжээний зарцуулалт 26%-иар буурч, даралтын тархалт сайжирсан байдлыг харуулав.

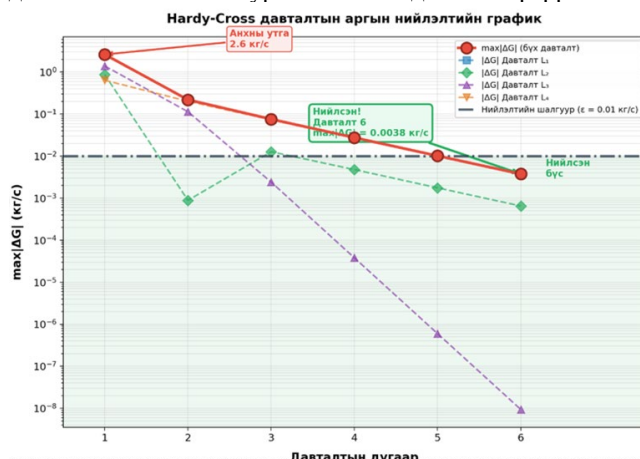
III. ТООЦООЛЫН ҮР ДҮН

А. Хувилбар А: Нэгдсэн сүлжээ ($3GDH, 110/70^\circ C$)

Hardy-Cross давталтын арга 8 удаа хийгдэж нийлсэн ($\max|\Delta G| < 0.01$ кг/с). Хоолойн гидравлик параметруудийг 3-р хүснэгтэд үзүүлэв.

$\max|\Delta G|$ утга экспоненциал хурдтай буурч, 4 давталт бүрийн (L_1-L_4) залруулга ялгаатай хурдтай нийлж байгааг логарифм масштабтаар харуулсан бөгөөд шугаман масштабтаар давталт бүрийн тоон утгыг тод дүрсэлсэн Hardy-Cross давталтын аргын нийлэлтийн

динамикийг Зураг 4-д үзүүлэв.



Зураг 3. Hardy-Cross давталтын аргын нийлэлтийн график ($\max|\Delta G| < 0.01$ кг/с)

Анхны давталтаас ДС-18 ба ДС-16-ийг үндсэн сүлжээнээс салгаснаар Маг-1 зарцуулалт $3,434 \rightarrow 2,550$ кг/с буюу -26% -иар буурч байна.

Хоолойн гидравлик параметрууд - хувилбар А

2-Р ХҮСНЭГТ.

Хувилбар А	L, м	Dn, мм	v, м/с	R, Па/м	ΔP, кПа
e1	3,064	1400	2.32	37.5	114.9
e2	2,859	1000	1.65	28.6	81.8
e3	1,893	1400	1.59	17.7	33.4
e4	435	1400	1.55	16.7	7.3
e5	2,618	800	1.48	30.4	79.5
e6	4,839	900	1.30	20.1	97.5
e7	7,726	800	1.41	27.5	212.5
e8	795	800	1.44	28.4	22.6
e9	1,770	700	1.32	28.5	50.4
e10	1,453	800	1.28	22.5	32.8
e11	1,501	600	1.49	43.7	65.6
e12	2,266	1200	1.23	12.7	28.8
e13	1,956	800	1.35	25.3	49.6

Үндсэн сүлжээний P_{min} = 1,262 кПа (ДС-21) болж, +345 кПа-аар сайжирсан. Тусдаа шугамаар холбогдох ДС-18-ийн даралт 1,027 кПа (+110 кПа), ДС-16-ийн даралт 1,166 кПа (+176 кПа) болсон.

В. Хувилбаруудын нэгтгэсэн харьцуулалт ба 4GDH шилжилтийн үнэлгээ

Хувилбаруудын харьцуулалт ба 4GDH нийцтэй байдал

3-Р ХҮСНЭГТ.

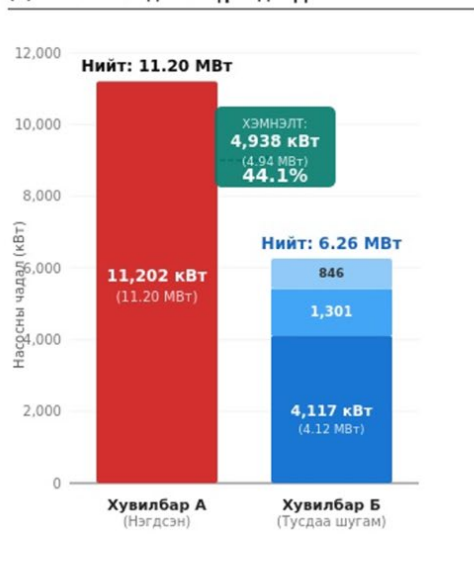
Параметр	А: Суурь	Б: Тусдаа	Зөрүү
Ерөнхий параметрууд			
Нийт дулааны ачаалал	958.3 МВт		
Р _{эх} (эх үүсвэр)	1,600 кПа		
Нийт зарцуулалт	5,723 кг/с	5,723 кг/с	—
Маг-1 зарцуулалт	3,434 кг/с	2,550 кг/с	-26%
v _{max}	2.32 м/с	1.73 м/с	-25%

Үндсэн сүлжээний насос			
P _{min}	917 кПа	1,262 кПа	+345 кПа
Н насос	1,503 кПа	744 кПа	-759 кПа
G нийт	5,723 кг/с	4,250 кг/с	-26%
N насос	11,202 кВт	4,117 кВт	-7,085 кВт
ДС-18 тусдаа (Зайсан, Δh=50 м)			
P (Зайсан)	—	1,027 кПа	+110 кПа
Н насос	—	1,261 кПа	—
G	—	793 кг/с	—
N насос	—	1,301 кВт	—
ДС-16 тусдаа (Нүхт, Δh=30 м)			
P (Нүхт)	—	1,166 кПа	+176 кПа
Н насос	—	954 кПа	—
G	—	681 кг/с	—
N насос	—	846 кВт	—
НИЙТ ДҮН			
НИЙТ НАСОС	11,202 кВт	6,264 кВт	-4,938 кВт
(МВт)	11.20 МВт	6.26 МВт	-4.94 МВт
ХЭМНЭЛТ	4,938 кВт (4.94 МВт)	▼ 44.1%	
4GDH (65/35°C) нийцтэй байдал			
v _{max} (4GDH)	3.10 м/с	2.30 м/с	—
v ≤ 3.0 м/с	Алдаатай	Нийцтэй	—
4GDH бэлэн эсэх	Үгүй	Тийм	—

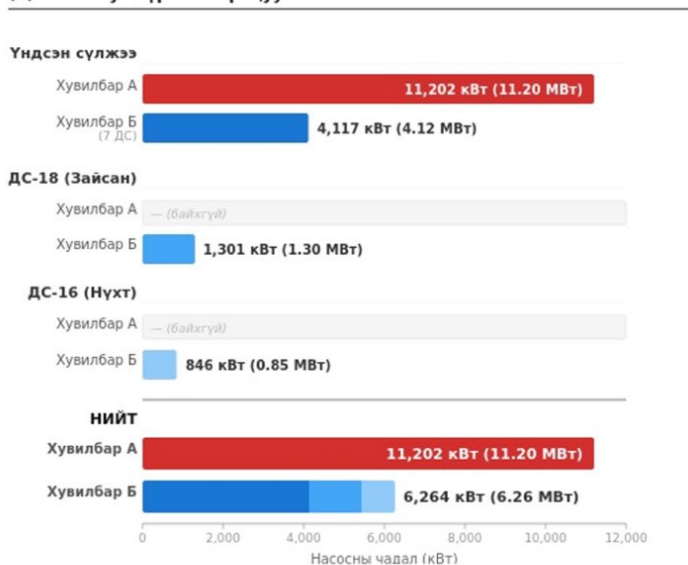
Тусдаа шугамын хувилбар нь 5-р хүснэгтэд үзүүлснээр нийт насосны чадлыг **4.94 МВт-аар**, хувиар илэрхийлвэл **44.1%-иар** бууруулсан. Энэ нь жилийн дулааны улиралд ойролцоогоор ~20.2 ГВтц цахилгаан эрчим хүчний хэмнэлттэй тэнцэнэ.

Хувилбаруудын насосны чадлын бүрэлдэхүүн задаргаа болон харьцуулалтыг Зураг 6-д графикаар дэлгэрэнгүй үзүүлэв. Зураг 6(a)-д босоо баганан диаграммаар нийт чадлын ялгааг, 6(b)-д хэвтээ баганан диаграммаар насос тус бүрийн чадлыг харьцуулсан. Хувилбар Б-д гурван бие даасан насосны нийт чадал 6,264 кВт болж Хувилбар А-ийн 11,202 кВт-аас 4,938 кВт (44.1%) бага: үндсэн сүлжээ 4,117 кВт (65.7%), ДС-18 тусдаа 1,301 кВт (20.8%), ДС-16 тусдаа 846 кВт (13.5%). Энэхүү хэмнэлтийн гол шалтгаан нь P_{min} 917 кПа-аас 1,262 кПа болж +345 кПа-аар сайжирсантай шууд холбоотой юм. 5-р хүснэгтийн 4GDH нийцтэй байдлын шинжилгээнээс харахад, Хувилбар А нь 4GDH горимд e1 хоолойн хурд 3.10 м/с хүрч зөвшөөрөгдөх 3.0 м/с хязгаарыг давж байна.

(a) Насосны чадлын бүрэлдэхүүн



(b) Насос тус бүрийн харьцуулалт



■ Хувилбар А — Нэгдсэн сүлжээ (9 ДС) ■ Хувилбар Б — Үндсэн сүлжээ (7 ДС) ■ ДС-18 тусдаа насос ■ ДС-16 тусдаа насос

Зураг 4. Хувилбар А ба Б-ийн насосны чадлын харьцуулсан диаграмм: (a) Насосны чадлын бүрэлдэхүүн задаргаа, (b) Насос тус бүрийн харьцуулалт

Харин Хувилбар Б нь 4GDH шилжилтэд ямар нэг хоолой шинэчлэлгүйгээр бүрэн нийцтэй байгаа нь Маг-1-ийн ачаалал 26%-иар буурсантай шууд холбоотой.

Дүгнэлт

- Улаанбаатар хотын 6 дүүрэг, 134 бүсийг хамарсан нийт 2,865.5 Гкал/цаг дулааны ачаалалтай төвлөрсөн дулааны хангамжийн сүлжээний топологийг хавтгайн графын онолоор загварчилж, холбоосын матриц болон хүрээний матриц байгуулан Кирхгофын хуулиудад суурилсан тэгшитгэлийн системийг тодорхойлов.
- Хан-Уул дүүргийн сүлжээний (V = 14, E = 17, L = 4) жишээн дээр Hardy-Cross давталтын аргаар 3GDH (110/70°C) горимын гидравлик тооцоолол хийж, ДС-18 (Зайсан) болон ДС-16 (Нүхт) дэд станцуудын өндөршлийн зөрүү (50 м, 30 м) ба алсын зай нь сүлжээний P_{min} = 917 кПа болгож, насосны чадлын шаардлагыг тодорхойлж байгааг тогтоов.
- Шугмын оновчлолын хувилбар (ДС-18, ДС-16-ийг ДЦС-4-өөс шууд хангах) нь нийт насосны чадлыг 11.20 МВт-аас 6.26 МВт болгож 44.1% (4.94 МВт) хэмнэлт үзүүлсэн бөгөөд даралтын тархалтыг мэдэгдэхүйц сайжруулсан.
- Хувилбар А ба Б-ийн бүх хоолойн 4GDH горимын хурдны харьцуулалтыг зураг 4-д дэлгэрэнгүй үзүүлэв. 4GDH горимд зарцуулалт 1.33 дахин нэмэгдэхэд Хувилбар А-д e1 хоолойн хурд v = 3.04 м/с хүрч 3.0 м/с хязгаарыг давж байхад, Хувилбар Б-ийн v_{max} = 2.16 м/с нь хоолой шинэчлэхгүйгээр 4GDH-д бүрэн нийцтэй байна.

5. 4GDH (65/35°C) горимд шилжих үнэлгээгээр тусдаа шугамын хувилбар нь ямар нэг хоолой шинэчлэлгүйгээр бүрэн нийцтэй (v_{max} = 2.30 м/с ≤ 3.0 м/с) болохыг харуулсан нь ирээдүйн 4GDH хэрэгжилтийн суурь нөхцөлийг хангаж байна.

6. Сийрэг матрицын алгоритм ашиглаж MATLAB програм хангамж дээр 16,000 гаруй хэрэглэгчтэй том хэмжээний сүлжээний тооцооллыг бага хугацаанд гүйцэтгэх боломжтой болсон нь энэхүү загварчлалын аргын масштабтай чанарыг баталж байна.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

- Lund, H., Werner, S., Wiltshire, R. et al. (2014). 4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems. Energy, 68, 1-11.
- Todini, E., & Pilati, S. (1988). A gradient algorithm for the analysis of pipe networks. Computer Applications in Water Supply, 1, 1-20.
- Cross, H. (1936). Analysis of flow in networks of conduits or conductors. University of Illinois Engineering Experiment Station Bulletin, 286.
- Diestel, R. (2017). Graph Theory (5th ed.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Frederiksen, S., & Werner, S. (2013). District Heating and Cooling. Studentlitteratur AB, Lund.
- Dalla Rosa, A., Li, H., & Svendsen, S. (2011). Method for optimal design of pipes for low-energy district heating. Energy, 36(5), 2407-2418.
- Hagberg, A.A., Schult, D.A., & Swart, P.J. (2008). Exploring network structure using NetworkX. Proc. 7th Python in Science Conference, 11-15.
- Шарапов, В.И., & Ротов, П.В. (2007). Регулирование нагрузки систем теплоснабжения. Ульяновск: УлГТУ.
- Ионин, А.А. (2010). Теплоснабжение: учебник для вузов. Москва: Стройиздат.