

Національний університет "Києво-Могилянська академія"
Факультет інформатики

Дослідження алгоритмів компресії у веб– середовищі

Дипломна робота

Студент: Синяк Олександр Ярославович

Науковий керівник: Зважій Д. В, асистент

Київ – 2026

Актуальність

- Медіанна веб-сторінка 2025 року: **2.2 МБ** (×2 за 10 років) – HTTP Archive
 - **82%** сайтів використовують стиснення, але переважно **Gzip** (стандарт 1996 року)
 - Нові алгоритми: **Brotli** (Google, 2016), **Zstandard** (Meta, в браузерях з **2024**)
 - Google враховує **Web Vitals** (LCP, FCP) при ранжуванні – стиснення впливає на SEO
 - Збільшення часу завантаження з 1 до 3 сек – **+32% відмов** користувачів
- Немає комплексного порівняння з реальними браузерними метриками, особливо для Zstandard

Мета, об'єкт, предмет, методи

Мета: порівняльне дослідження алгоритмів Gzip, Brotli та Zstandard у веб-середовищі та формулювання практичних рекомендацій

Об'єкт: процес HTTP-компресії даних у веб-середовищі

Предмет: характеристики алгоритмів – ефективність стиснення, швидкодія, вплив на метрики продуктивності браузера

Методи:

- Експериментальне вимірювання та профілювання
- Автоматизоване браузерне тестування (Playwright)
- Статистичний аналіз та порівняння

Завдання та проблематика

Завдання:

1. Теоретичний аналіз алгоритмів
2. Розробка системи автоматизованого тестування
3. Проведення експериментів: серверні + браузерні тести
4. Аналіз результатів та формулювання рекомендацій

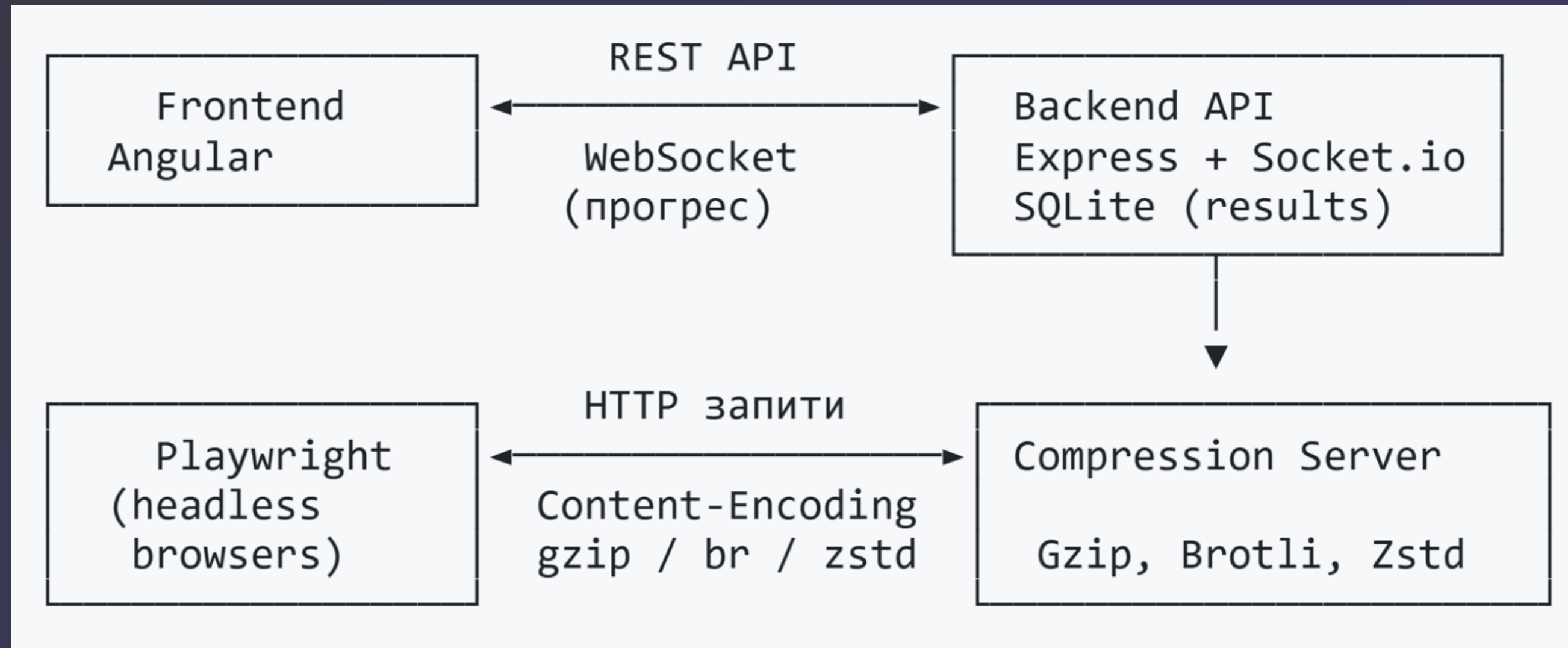
Проблематика:

- Існуючі бенчмарки порівнюють лише серверні метрики (ratio, speed)
- Ніхто не вимірює **реальний вплив на завантаження** в браузері
- Zstandard – немає досліджень поведінки в реальних браузерах

Існуючі аналоги:

- Squash, Izbench – порівнюють 30+ алгоритмів стиснення, тільки серверні метрики: ratio та speed; немає браузерного тестування, немає Web Vitals
- Lighthouse, WebPageTest – вимірює Web Vitals для реального сайту; але не дає вибирати алгоритм стиснення

Архітектура системи тестування



Технології: Node.js, Express, Socket.io, SQLite, Angular, Playwright, web-vitals

Як працює тестування

Серверне тестування

(файл × алгоритм × рівень)

1. Compress з профілюванням
2. Decompress з профілюванням
3. Верифікація цілісності
4. Розрахунок: ratio, speed (МБ/с)

Браузерне тестування

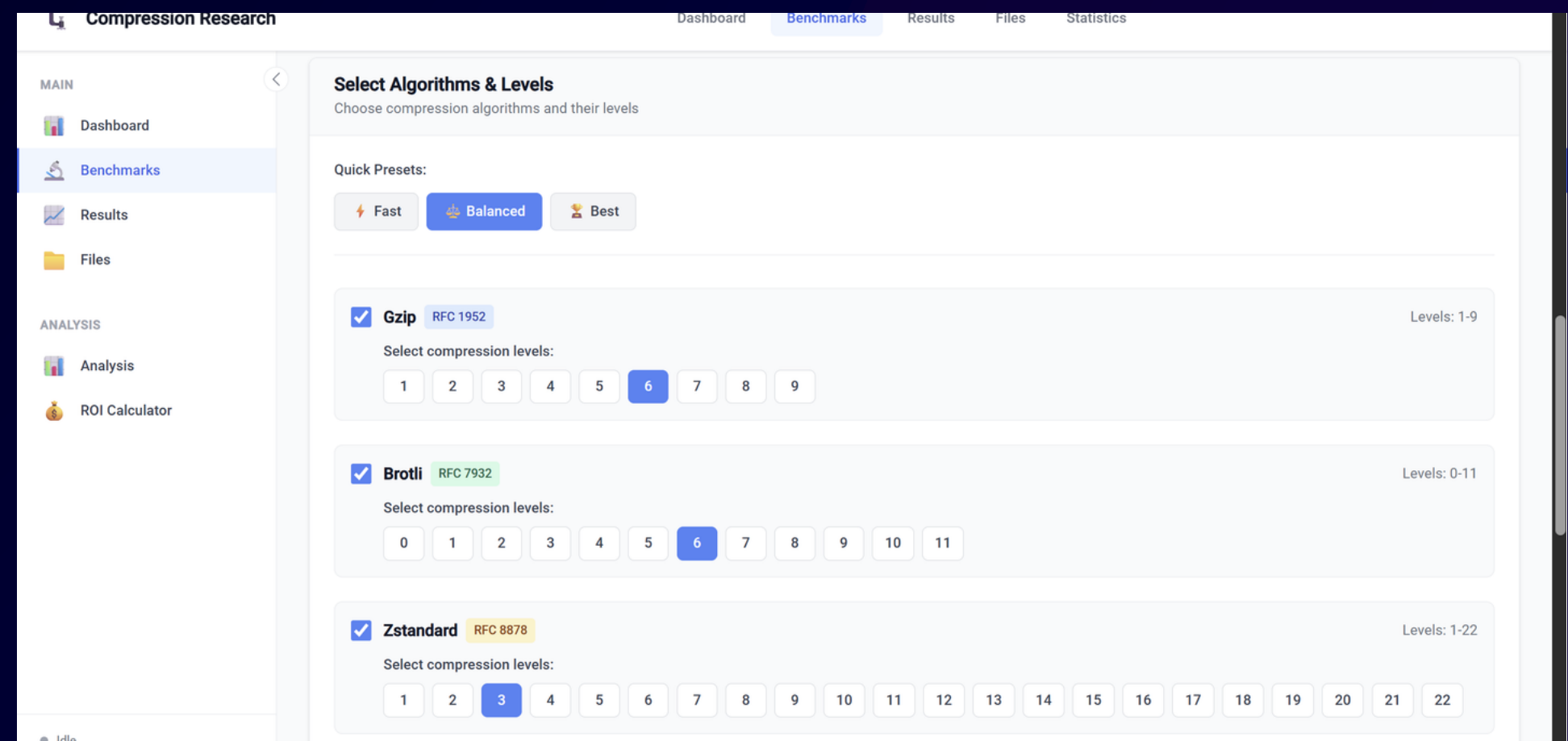
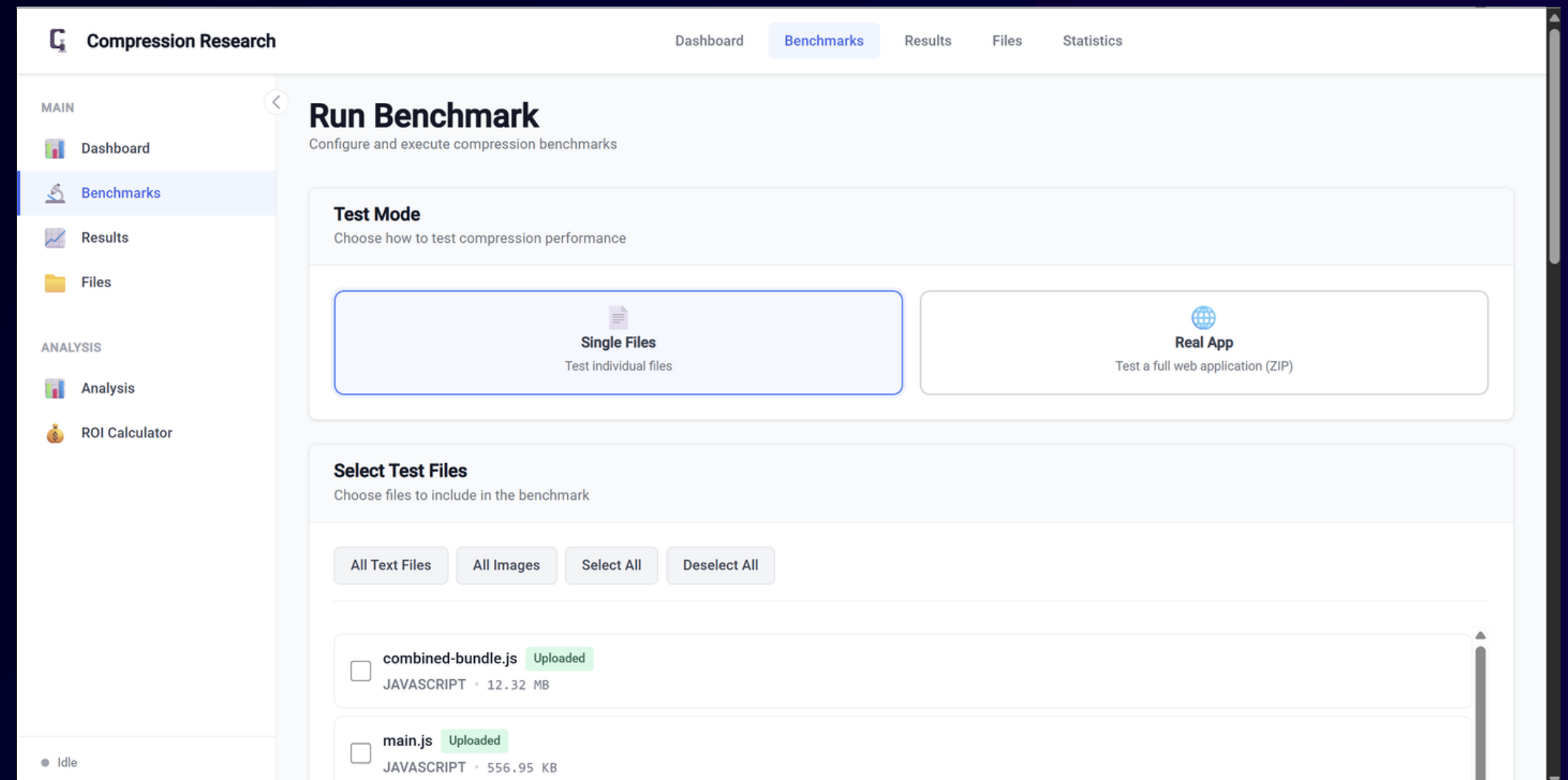
(алгоритм × браузер × мережа)

1. Headless-браузер (Chromium / Firefox / WebKit)
2. Троттлінг: Fast 3G / 4G / DSL
3. Навігація → файл з 'Content-Encoding'
4. **Web Vitals:** LCP, FCP, CLS, TTFB
5. **Performance API:** domContentLoaded, transferSize

Демо: інтерфейс запуску бенчмарку

Користувач обирає:

- Тестові файли
- Алгоритми + рівні
- Браузери
- Мережеві профілі



Browser Tests (Optional)

Test in real browsers with Web Vitals metrics

☒ Enable browser testing with Playwright

Measure real user experience metrics (LCP, FCP, CLS) in actual browsers

SELECT BROWSERS

☒  Chrome/Edge

☐  Firefox

☐  Safari

SELECT NETWORK PROFILES

☐ Fast 3G
1.6 Mbps, 150ms latency

☒ 4G
4 Mbps, 50ms latency

☐ DSL
2 Mbps, 5ms latency

1 browser tests will run

 Browser tests measure real user experience metrics like LCP, FCP, and CLS

Benchmark Description

Optional description for this benchmark run



MAIN

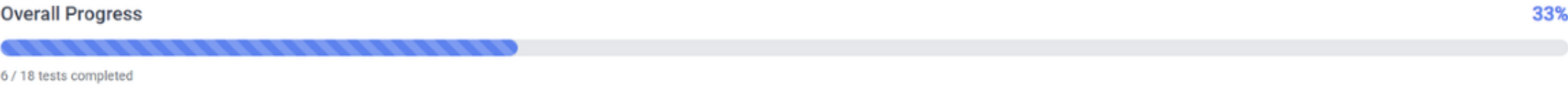
-  Dashboard
-  Benchmarks
-  Results
-  Files

ANALYSIS

-  Analysis
-  ROI Calculator

● Idle

Running Benchmark...



Current Test: main.js zstd Level 3

Compressed Size:	Ratio:	Time:
102.24 KB	81.6%	2.19ms

 Pause

 Stop

Live Log

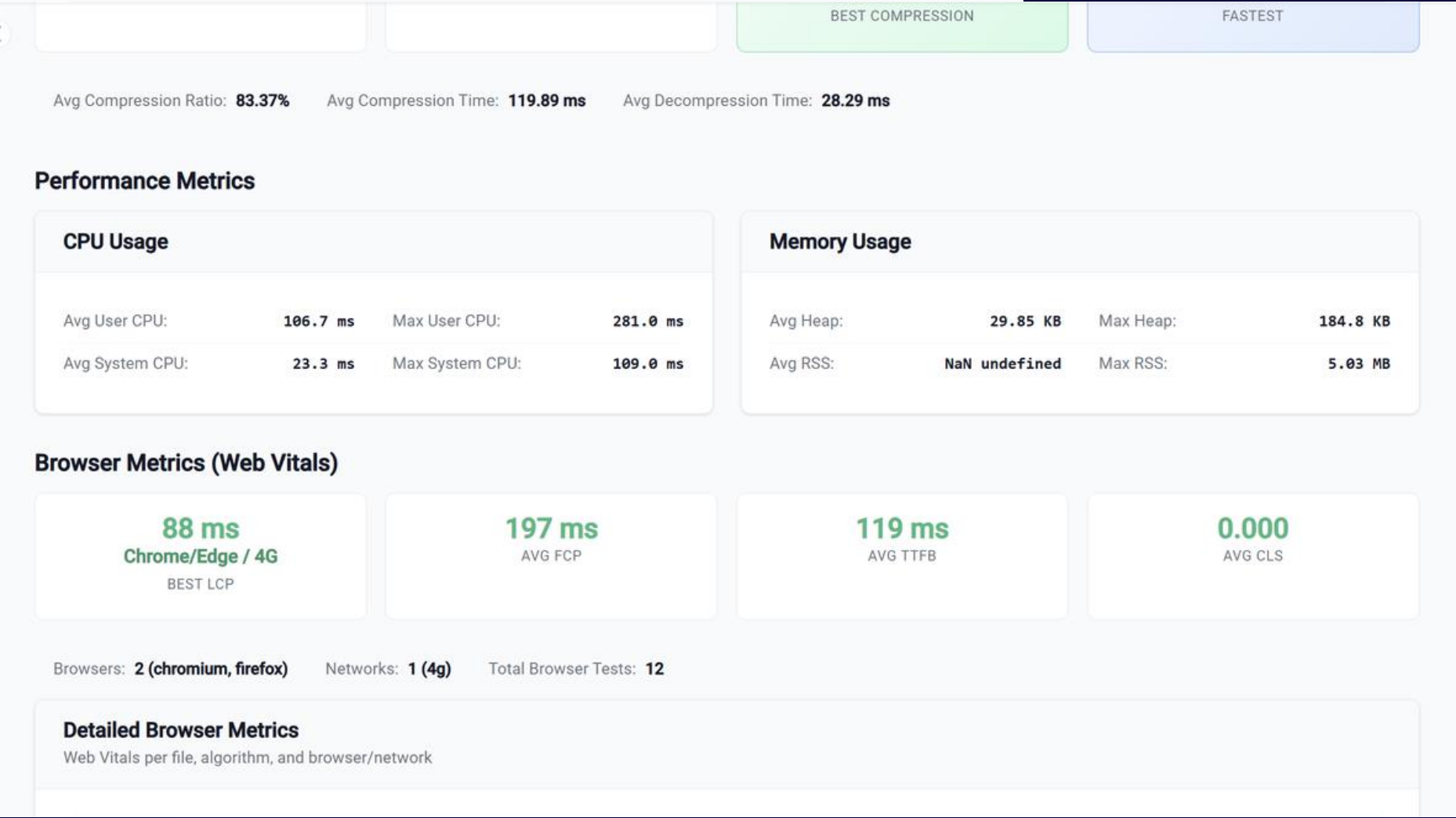
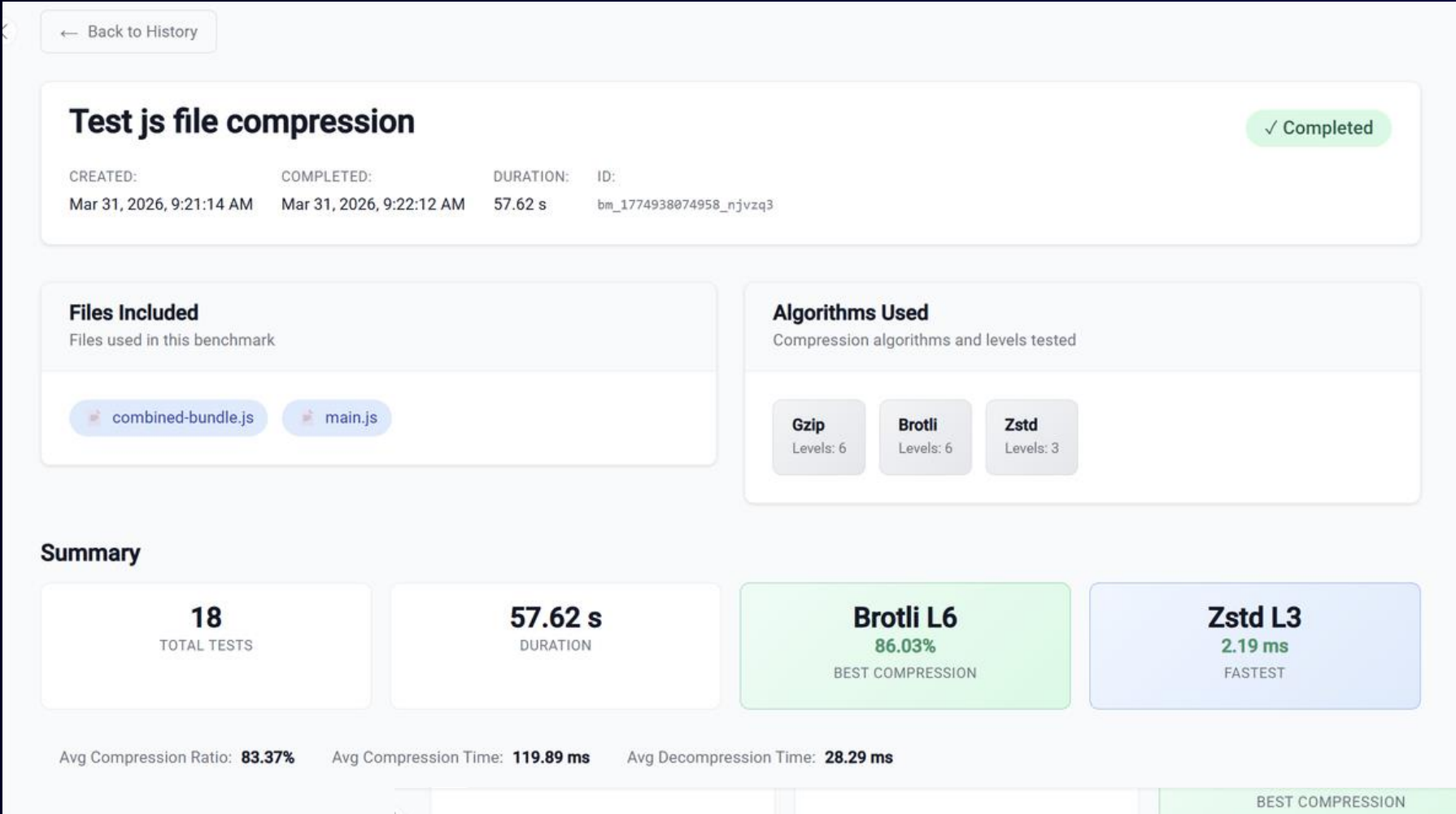
[Clear](#)

```
09:21:14.979 INFO Benchmark started: bm_1774938074958_njvzq3
09:21:15.486 INFO Completed gzip level 6 on combined-bundle.js - 82.56% compression
09:21:15.932 INFO Completed brotli level 6 on combined-bundle.js - 86.03% compression
09:21:16.039 INFO Completed zstd level 3 on combined-bundle.js - 82.78% compression
09:21:16.120 INFO Completed gzip level 6 on main.js - 82.66% compression
09:21:16.176 INFO Completed brotli level 6 on main.js - 84.55% compression
09:21:16.195 INFO Completed zstd level 3 on main.js - 81.64% compression
09:21:16.242 INFO Starting browser tests with 2 browsers and 1 network profiles...
```


Демо: результати серверного тестування

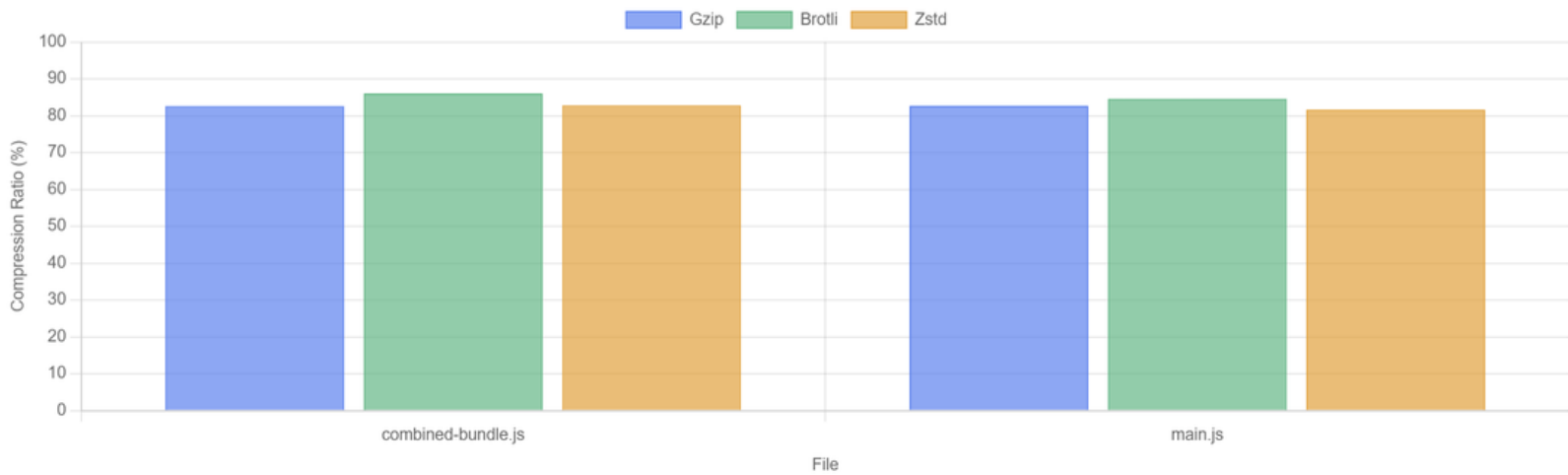
Для кожної комбінації:

- Коефіцієнт стиснення
- Розмір стисненого файлу
- Час компресії / декомпресії
- Швидкість (МБ/с)



Compression Comparison

Best compression ratio per algorithm for each file



Results by File

▶ combined-bundle.js	javascript	12.32 MB	Best: Brotli L6 (86.03%)	Fastest: Zstd L3 (68.66 ms)
▶ main.js	javascript	556.95 KB	Best: Brotli L6 (84.55%)	Fastest: Zstd L3 (2.19 ms)

All Results

Complete test results with sorting

FILE ↑	ALGORITHM ↓	LEVEL ↓	ORIGINAL ↓	COMPRESSED ↓	RATIO ↓	COMP. TIME ↓	DECOMP. TIME ↓
combined-bundle.js	Gzip	6	12.32 MB	2.15 MB	82.56%	280.36 ms	59.91 ms
combined-bundle.js	Brotli	6	12.32 MB	1.72 MB	86.03%	331.37 ms	66.31 ms
combined-bundle.js	Zstd	3	12.32 MB	2.12 MB	82.78%	68.66 ms	30.70 ms
main.js	Gzip	6	556.95 KB	96.6 KB	82.66%	17.00 ms	5.20 ms
main.js	Brotli	6	556.95 KB	86.08 KB	84.55%	19.76 ms	5.81 ms
main.js	Zstd	3	556.95 KB	102.24 KB	81.64%	2.19 ms	1.78 ms

6 results

Download CSV

Download JSON

Re-run Benchmark

Delete

Results by File

▼ combined-bundle.js javascript 12.32 MB Best: Brotli L6 (86.03%) Fastest: Zstd L3 (68.66 ms)

ALGORITHM	LEVEL	COMPRESSED SIZE	RATIO	COMP. TIME	DECOMP. TIME	SPEED
Gzip	6	2.15 MB	82.56%	280.36 ms	59.91 ms	43.96 B/s
Brotli	6	1.72 MB	86.03%	331.37 ms	66.31 ms	37.19 B/s
Zstd	3	2.12 MB	82.78%	68.66 ms	30.70 ms	179.5 B/s

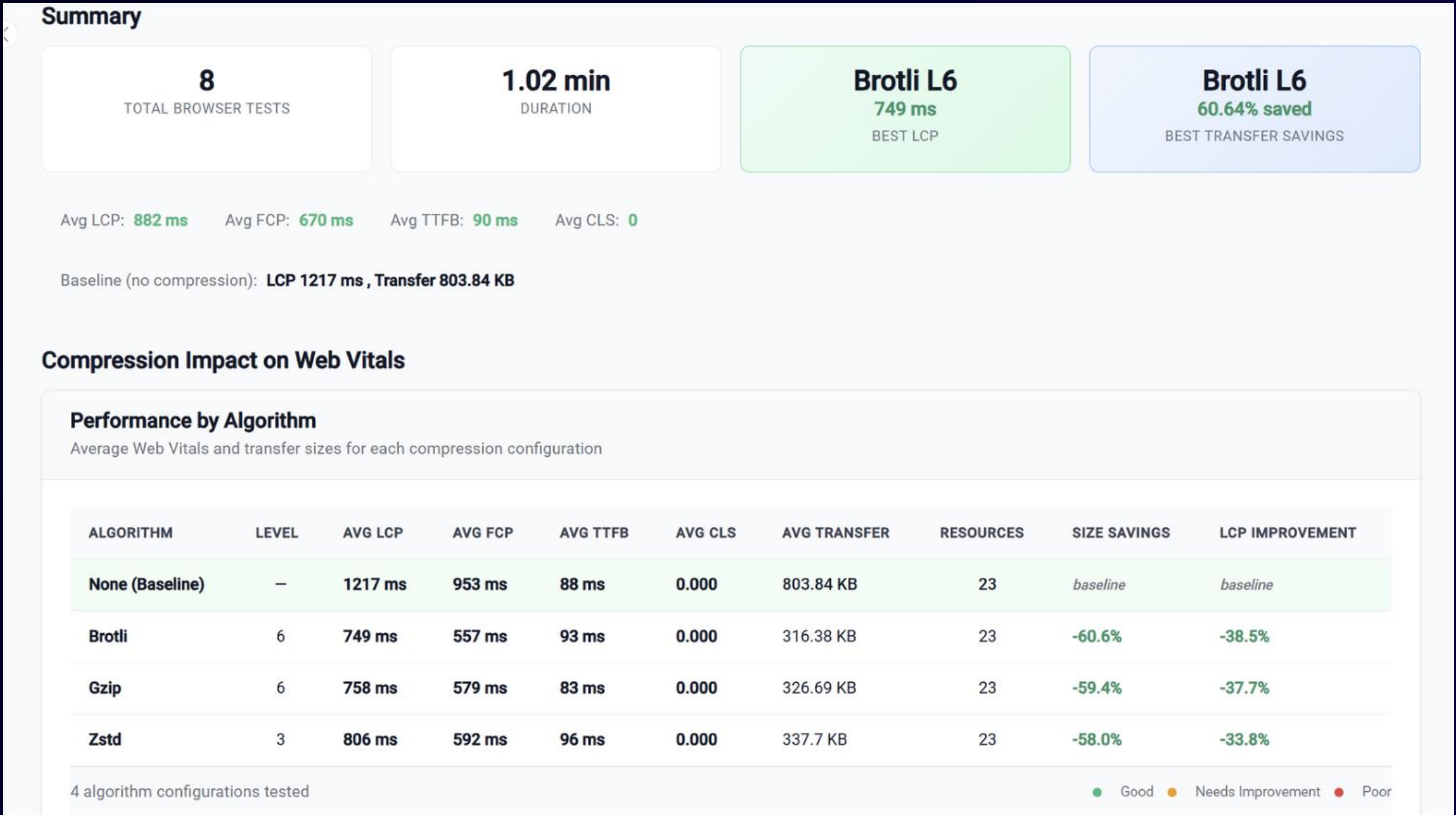
▼ main.js javascript 556.95 KB Best: Brotli L6 (84.55%) Fastest: Zstd L3 (2.19 ms)

ALGORITHM	LEVEL	COMPRESSED SIZE	RATIO	COMP. TIME	DECOMP. TIME	SPEED
Gzip	6	96.6 KB	82.66%	17.00 ms	5.20 ms	31.99 B/s
Brotli	6	86.08 KB	84.55%	19.76 ms	5.81 ms	27.53 B/s
Zstd	3	102.24 KB	81.64%	2.19 ms	1.78 ms	248.38 B/s

Демо: браузерні метрики

Для кожного алгоритм × браузер × мережа:

- LCP, FCP, TTFB, CLS
- domContentLoaded
- transferSize, resourceDuration



All Browser Tests

Complete browser test results with sorting

ALGORITHM ↑	LEVEL ↓	BROWSER ↓	NETWORK ↓	LCP ↓	FCP ↓	CLS ↓	TTFB ↓	LOAD COMPLETE ↓	TRANSFER SIZE ↓	RESOURCES ↓
Brotli	6	Chrome/Edge	4G	896 ms	724 ms	0.000	5 ms	842 ms	284.98 KB	21
Brotli	6	Firefox	4G	601 ms	390 ms	0.000	180 ms	600 ms	347.77 KB	24
Gzip	6	Chrome/Edge	4G	904 ms	744 ms	0.000	4 ms	806 ms	295.3 KB	21
Gzip	6	Firefox	4G	612 ms	413 ms	0.000	161 ms	621 ms	358.08 KB	24
None	—	Chrome/Edge	4G	1808 ms	1544 ms	0.000	6 ms	3138 ms	772.44 KB	21
None	—	Firefox	4G	626 ms	362 ms	0.000	169 ms	638 ms	835.23 KB	24
Zstd	3	Chrome/Edge	4G	972 ms	772 ms	0.000	4 ms	832 ms	306.3 KB	21
Zstd	3	Firefox	4G	640 ms	412 ms	0.000	188 ms	652 ms	369.09 KB	24

8 browser tests

● Good ● Needs Improvement ● Poor

Результати: ефективність стиснення

Файл	Розмір	Gzip-6	Brotli-6	Zstd-3
sample.html	9.6 КБ	72.7%	75.8%	70.2%
sample.css	8.0 КБ	79.2%	80.7%	76.4%
sample.js	14.4 КБ	75.0%	76.5%	73.0%
sample.json	13.1 КБ	71.9%	74.4%	69.6%
combined-bundle.js	12.3 МБ	82.6%	86.0%	82.8%

Максимальні рівні (великий JS): Brotli-11: 88.1% | Zstd-22: 88.5% | Gzip-9: 82.8%

Brotli лідирує на текстових файлах (+2-4%). Zstd-22 наздоганяє Brotli-11 на великих файлах.

Результати: швидкість

Компресія (МБ/с)

Рівень	Gzip	Brotli	Zstd
Fast	101.4 МБ/с	222.5 МБ/с	231.9 МБ/с
Balanced	41.8 МБ/с	31.9 МБ/с	244.6 МБ/с
Best	20.4 МБ/с	0.6 МБ/с	1.9 МБ/с

Декомпресія (МБ/с)

Рівень	Gzip	Brotli	Zstd
Fast	210.5 МБ/с	167.1 МБ/с	415.0 МБ/с
Balanced	245.9 МБ/с	235.5 МБ/с	429.3 МБ/с
Best	157.3 МБ/с	211.5 МБ/с	400.2 МБ/с

Zstd-3: компресія у **5.9×** швидше за Gzip-6, декомпресія **429 МБ/с** (не залежить від рівня)

Brotli-11: 0.6 МБ/с = 20 сек на 12 МБ – тільки для pre-compression

Результати: браузерні метрики

Реальний **Angular**–додаток (43 файли, 1595 КБ), 4G, Chromium:

Алгоритм	LCP	FCP	Transfer Size
Без стиснення	1 808 мс	1 504 мс	791 КБ
Gzip-6	1 156 мс	925 мс	302 КБ
Brotli-6	900 мс	720 мс	292 КБ

Аномалія **WebKit (Safari)**

Brotli-11 на 12 МБ файлі:

- Chromium: **112 мс** → WebKit: **15 625 мс** (×139!)
- Причина: блокуюча декомпресія в головному потоці

Новизна та практична цінність

Наукова новизна

- Порівняння за реальними Web Vitals у 3 браузерах × 3 мережах
- Zstandard досліджено в контексті браузерних завантажень
- Виявлено аномалію WebKit

Рекомендації

- **Статичний контент:** Brotli-11 або Zstd-22 (pre-compress)
- **Динамічний API:** Zstd-3 (8× менше CPU ніж Gzip)
- **Fallback:** Gzip-6 (100% підтримка)

Дякую за увагу!