

۱. تکرارهای اصلی: (Outer Loop) کاهش μ

- به خروجی‌های ---"تکرار اصلی"--- توجه کنید. در تکرار ۱، الگوریتم با $\mu = 10.0$ شروع می‌کند. در تکرار ۲، μ به 1.0 کاهش می‌یابد، سپس به 0.1، 0.01 و ...
- نکته کلیدی برای ارائه μ : بزرگ باعث می‌شود تابع مانع (جریمه نزدیک شدن به مرزها) وزن زیادی داشته باشد. به همین دلیل، نقطه بهینه زیرمسئله اول $[4.68, 17.62]$ فاصله‌ی نسبتاً زیادی از مرزهای واقعی ناحیه ممکن دارد. هرچه μ کوچکتر می‌شود، الگوریتم اجازه پیدا می‌کند که به مرزها نزدیک‌تر شود تا مقدار تابع هدف اصلی را بهبود دهد.

۲. تکرارهای داخلی: (Inner Loop) روش نیوتن

- زیر هر تکرار اصلی، یک جدول کوچک وجود دارد. این جدول، مراحل روش نیوتن برای یافتن نقطه بهینه برای μ ثابت همان مرحله را نشان می‌دهد.
- **Iter:** شماره تکرار روش نیوتن.
- **x_k:** مختصات نقطه در شروع آن تکرار.
- **f(x):** مقدار تابع هدف/صلی در آن نقطه.
- **||grad_P||:** مهم‌ترین ستون. این عدد، اندازه (نرم) گرادیان تابع هدف ترکیبی (هدف + مانع) است. هدف روش نیوتن، رساندن این عدد به صفر است. وقتی این مقدار از tolerance (در اینجا $1e-5$ کمتر می‌شود، حلقه داخلی متوقف شده و می‌گوییم برای μ فعلی به همگرایی رسیده‌ایم.
- **alpha:** اندازه گام انتخاب شده. مقدار 1.0 یعنی گام کامل نیوتن برداشته شده است. مقادیر کوچکتر نشان می‌دهد که الگوریتم برای خارج نشدن از ناحیه ممکن، گام خود را کوتاه‌تر کرده است.

۳. تحلیل مسیر حرکت

- از تکرار ۱ تا ۴ اصلی: الگوریتم با μ بزرگ شروع کرده و در مرکز ناحیه ممکن قرار دارد. مقدار تابع هدف $f(x)$ از -22.5 به 18.19 می‌رسد.
- از تکرار ۵ به بعد: با بسیار کوچک شدن μ ، تأثیر تابع مانع تقریباً از بین می‌رود. الگوریتم به سرعت به سمت مرزهای قیود حرکت می‌کند تا تابع هدف را مینیمم کند. می‌بینید که نقطه به سرعت به سمت $[4.0, 14.0]$ حرکت می‌کند که روی مرز دو قید $x_2 \geq 14$ و $x_1 + x_2 - 10 \leq 0$ قرار دارد.
- جواب نهایی: جواب نهایی $[4.000, 14.000]$ با مقدار هدف 18.0 به دست آمد. این یک بهینه محلی است. جالب است که حل‌کننده IPOPT در کد قبلی جواب $[5.0, 30.0]$ با مقدار هدف 35.0 را پیدا کرده بود که بهینه سراسری

است. این تفاوت به دلیل ماهیت غیرمحدب مسئله و نقطه شروع متفاوت است و نکته آموزشی بسیار خوبی برای ارائه شماست که نشان می‌دهد الگوریتم‌های محلی به نقطه شروع حساس هستند.