

Optoelectronic

Open
Access

ORIGINAL ARTICLE

Efficiency and Work Quantum Otto Machine in Contact with Non-Thermal Reservoir

Sajjad Hashemi Abasabadi¹, Sayyed Yahya Mirafzali^{2*}, Hamid Reza Baghshahi³

1 Ph.D. Student, Department of Physics, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran.

2 Assistant Professor, Department of Physics, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran.

3 Associate Professor, Department of Physics, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran.

Correspondence

Sayyed Yahya Mirafzali

Email: m.soroosh@scu.ac.ir

How to cite

Hashemi Abasabadi, S. Mirafzali, S.Y. Baghshahi, H.R. (2023). Efficiency and work quantum Otto machine in contact with non-thermal reservoir, Optoelectronic, 6(1), 51-58.

ABSTRACT

In quantum thermal machines, by using a quantum working substance work can be produced. In a quantum Otto machine, if the difference between energy levels are changed by the same ratio in the adiabatic process, the efficiency of this machine is the same as its classical counterparts; however, if this difference is changed inhomogeneously, it will have larger efficiency. Additionally, by the use of non-thermal reservoir (squeezed thermal or coherent thermal) instead of thermal reservoir more work and efficiency can be produced. In this investigation, using a simple harmonic oscillator as the working substance in the quantum Otto machine and adding a delta barrier, in order to make the inhomogeneous difference in energy levels, also considering a non-thermal reservoir, the efficiency and work are investigated. The results show that by utilizing this working substance and non-thermal reservoir, will make efficiency and work to be increased in the special frequency interval.

KEYWORDS

Quantum Otto Machine, Efficiency, Coherent Thermal Reservoir, Squeezed Thermal Reservoir.

فصلنامه علمی
اپتوالکترونیک

«مقاله پژوهشی»

بازده و کار ماشین اتو کوانتومی در تماس با حمام غیر گرمایی

سجاد هاشمی عباس آبادی¹، سید یحیی میرافضلی^{2*}، حمیدرضا باغشاهی³

چکیده

در ماشین‌های گرمایی کوانتومی با به کار بردن ماده کار کوانتومی می‌توان کار تولید کرد. در ماشین اتو کوانتومی اگر اختلاف بین سطوح انرژی در فرآیند بی‌دررو به صورت همسان تغییر کنند بازده این ماشین مشابه بازده همثای کلاسیکی خود است، ولی اگر این اختلاف به صورت ناهمسان تغییر نماید بازده بیشتری نسبت به همثای کلاسیکی خود دارد. به علاوه، با استفاده از منبع غیر گرمایی (چلانده گرمایی یا همدوس گرمایی) به جای منبع گرمایی می‌توان بازده و کار بیشتری تولید کرد. در این پژوهش با استفاده از نوسانگر هماهنگ ساده به عنوان ماده کار برای ماشین اتو کوانتومی و اضافه کردن سد دلتا به منظور ایجاد اختلافی ناهمسان در سطوح انرژی و همچنین در نظر گرفتن منبع غیر گرمایی، بازده و کار خالص بررسی می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از این ماده کار و منبع غیر گرمایی باعث می‌شود در یک محدوده فرکانسی، بازده و کار خالص بیشتر گردد.

واژه‌های کلیدی

ماشین اتو کوانتومی، بازده، حمام همدوس گرمایی، حمام چلانده گرمایی.

- 1 دانشجوی دکتری، گروه فیزیک، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان.
- 2 استادیار، گروه فیزیک، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان.
- 3 دانشیار، گروه فیزیک، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان.

نویسنده مسئول:

سید یحیی میرافضلی

رایانامه: y.mirafzali@vru.ac.ir

استناد به این مقاله:

سجاد هاشمی عباس آبادی، سید یحیی میرافضلی، حمیدرضا باغشاهی (1402). بازده و کار ماشین اتو کوانتومی در تماس با حمام غیر گرمایی. فصلنامه علمی اپتوالکترونیک، 6(1)، 58-51.

مقدمه

در ترمودینامیک کلاسیک، ماشین گرمایی به ماشینی گفته می‌شود که انرژی گرمایی را در یک چرخه ترمودینامیکی با استفاده از اختلاف دمای بین یک حمام گرم و یک حمام سرد به کار مکانیکی تبدیل کند. این چرخه‌ها از فرآیندهای ترمودینامیکی مختلفی تشکیل شده‌اند که با تغییرات آن‌ها می‌توان ماشین‌های گرمایی گوناگونی ساخت. به‌طور مثال، با دو فرآیند بی‌دررو و هم‌حجم می‌توان یک ماشین اتو به‌وجود آورد. نکته مهم در ماشین‌های گرمایی این است که همه گرمایی دریافتی را نمی‌توان به کار تبدیل کرد و بنابراین بازده این ماشین‌های گرمایی هیچ‌گاه یک نمی‌شود [1 و 2].

در ترمودینامیک کوانتومی، ماشین‌های گرمایی کوانتومی با به کار بردن ماده‌کار کوانتومی و باز تعریف فرآیندهای ترمودینامیکی، در تشابه با همتای کلاسیکی خود تعریف می‌شوند. به‌طور مثال، ماشین اتو از دو فرآیند بی‌دررو و دو فرآیند هم‌حجم تشکیل شده است که با باز تعریف این فرآیندها به صورت کوانتومی می‌توان ماشین اتو کوانتومی ساخت [3]. در ماشین اتو کوانتومی در دو فرآیند بی‌دررو، هامیلتونی ماده‌کار به طور آهسته تغییر می‌کند به نحوی که احتمال اشغال ترازهای انرژی بدون تغییر باقی می‌ماند. اگر این تغییر در هامیلتونی ماده‌کار به گونه‌ای باشد که اختلاف بین ترازهای انرژی با نسبت یکسان تغییر کنند، بازده این ماشین مانند همتای کلاسیکی خود می‌باشد [3]، اما اگر تغییر در هامیلتونی ماده‌کار به گونه‌ای باشد که اختلاف بین ترازهای انرژی در فرآیند بی‌دررو به صورت ناهمسان تغییر کنند، بازده ماشین نسبت به همتای کلاسیکی خود بیشتر می‌شود [4 و 5]. تحقیقات اخیر در زمینه ماشین‌های گرمایی کوانتومی شامل چرخه‌های اتو کوانتومی با استفاده از تک یون یا تک اتم به دام افتاده [6 و 7]، دستگاه‌های اپتومکانیکی [8 و 9] و کیوبیت‌های ابررسانایی [10] می‌باشد. این ماشین‌ها می‌توانند کار و بازده بیشتری در مقایسه با همتای کلاسیکی خودشان تولید و حتی تا نزدیک حد ماشین کارنو کلاسیکی کار کنند [11].

یکی دیگر از موارد مورد توجه که می‌تواند باعث بهبود کارکرد ماشین گرمایی کوانتومی شود استفاده از حمام غیرگرمایی به جای حمام گرمایی در چرخه ماشین‌های گرمایی کوانتومی است [12]. تحت این شرایط بازده می‌تواند از حد کارنو نیز بگذرد. به‌طور ویژه، با استفاده از نوسانگر هماهنگ به عنوان ماده‌کار ماشین گرمایی اتو کوانتومی که بین یک حمام سرد و یک حمام گرم همدوس گرمایی (چلانده گرمایی) عمل می‌کند، بازده می‌تواند حتی به یک برسد [12-15].

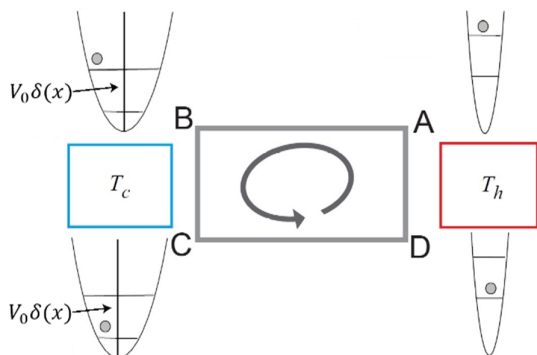
در این پژوهش با استفاده از نوسانگر هماهنگ ساده به عنوان ماده‌کار برای ماشین اتو کوانتومی و اضافه کردن سد دلتا در مرکز آن در فرآیند بی‌دررو (به منظور ایجاد تغییر ناهمسان در ترازهای انرژی نوسانگر [16]) و همچنین با در نظر گرفتن منبع همدوس و چلانده گرمایی، کار خالص انجام شده و بازده این ماشین بررسی خواهد شد.

ماشین اتو کوانتومی

در این بخش با در نظر گرفتن نوسانگر هماهنگ ساده و اضافه کردن سد دلتا در مرکز آن به عنوان ماده‌کار برای ماشین اتو کوانتومی، بازده و کار خالص انجام شده در دو مورد متفاوت بررسی خواهد شد. اولین مورد ماشین اتو کوانتومی که بین دو حمام گرمایی، یک حمام سرد و یک حمام گرم، عمل می‌کند و دومین مورد، ماشین اتو کوانتومی که بین یک حمام سرد گرمایی و یک حمام گرم همدوس گرمایی (چلانده گرمایی) عمل می‌کند بررسی می‌شود.

ماشین اتو کوانتومی در تماس با حمام گرمایی

در این بخش ماشین اتو کوانتومی که بین یک حمام سرد گرمایی در معکوس دمای $b_c = 1/k_B T_c$ و یک حمام گرم گرمایی در معکوس دمای $b_h = 1/k_B T_h$ عمل می‌کند، بررسی خواهد شد. مطابق شکل 1 چرخه اتو شامل دو فرآیند هم‌حجم ($A \rightarrow B$) و ($D \rightarrow C$) و دو فرآیند بی‌دررو ($B \rightarrow C$ و $D \rightarrow A$) می‌باشد.



شکل 1. چرخه ماشین اتو کوانتومی با به کار بردن نوسانگر هماهنگ ساده به اضافه سد دلتا در مرکز آن به عنوان ماده‌کار بین دو حمام، یک حمام سرد

با دمای T_c و دیگری حمام گرم با دمای T_h

با در نظر گرفتن نوسانگر هماهنگ ساده به اضافه سد دلتا در مرکز آن به عنوان ماده‌کار می‌توان هامیلتونی سامانه را به صورت زیر نوشت:

$$H = \frac{p^2}{2m} + \frac{1}{2} m \omega^2 x^2 + V_0 \delta(x) \quad (1)$$

افزون تابع دلتا به پتانسیل نوسانگر هماهنگ ساده باعث می‌شود انرژی ترازهای فرد نوسانگر بدون تغییر باقی بماند ولی

و ابتدایی این فرآیند به دست می آید.

فرآیند $C \otimes D$: فرآیند تراکم بی دررو است که در آن ماده کار در تماس با هیچ کدام از حمام های گرمایی نیست. در طول این فرآیند هامیلتونی سامانه با تغییر فرکانس و حذف تابع دلتا از وسط پتانسیل نوسانگر هماهنگ، از

$$H_h = \frac{p^2}{2m} + \frac{1}{2} m \omega_h^2 x^2 \quad \text{به} \quad H_c = \frac{p^2}{2m} + \frac{1}{2} m \omega_c^2 x^2 + V_0 d(x)$$

می کند به نحوی که احتمال اشغال ترازهای انرژی تغییر نکرده و با احتمال اشغال ترازهای انرژی در نقطه C برابر است. در این فرآیند هیچ گرمایی مبادله نمی شود، بنابراین با توجه به قانون اول ترمودینامیک کل تغییرات انرژی درونی به صورت کار خواهد بود، به عبارتی کاری که در این فرآیند انجام می شود از اختلاف انرژی درونی نقاط انتهایی و ابتدایی این فرآیند به دست می آید.

فرآیند $D \otimes A$: فرآیند هم حجم گرمایر است که در آن ماده کار در تماس حمام گرم قرار دارد. در طول این فرآیند هامیلتونی سامانه بدون تغییر باقی می ماند فقط احتمال اشغال ترازهای انرژی تغییر می کنند. در طی این فرآیند هیچ کاری انجام نمی شود، بنابراین با توجه به قانون اول ترمودینامیک کل تغییرات انرژی درونی به صورت گرما داده شده به حمام سرد خواهد بود، به عبارتی گرمایی که در این فرآیند از دست داده می شود از اختلاف انرژی درونی نقاط انتهایی و ابتدایی این فرآیند به دست می آید.

اکنون با داشتن ویژه مقادیر هامیلتونی، می توان گرمای جذب شده از حمام گرم، Q_h ، گرمای داده شده به حمام سرد، Q_c ، کار خالص انجام شده، W_{out} و بازده، h ، ماشین اتو کوانتومی را به صورت زیر محاسبه کرد [4]:

$$Q_h = \langle H_h \rangle_A - \langle H_h \rangle_D$$

$$= \text{Tr}((r_A - r_D) H_h) \quad (3)$$

$$= \sum_n \langle E_{n,h} | \frac{e^{-\beta H_h}}{Z_h} - \frac{e^{-\beta H_h}}{Z_c} | \rangle$$

$$Q_c = \langle H_c \rangle_C - \langle H_c \rangle_B$$

$$= \text{Tr}((r_C - r_B) H_c) \quad (4)$$

$$= \sum_n \langle E_{n,c} | \frac{e^{-\beta H_c}}{Z_c} - \frac{e^{-\beta H_c}}{Z_h} | \rangle$$

$$W_{out} = Q_h + Q_c, \quad h = \frac{W_{out}}{Q_h} \quad (5)$$

در اینجا $E_{n,c}$ و $E_{n,h}$ به ترتیب ویژه مقادیر H_c و H_h و همچنین r_i ($i = A, B, C, D$) ماتریس چگالی نقطه i می باشند.

انرژی ترازهای زوج، تا تقریب مرتبه اول به صورت زیر تغییر کنند ($w=1, h=1, m=1$) [16]:

$$E_{2n} = 2n + \frac{1}{2} + \frac{2}{p} \tan^{-1} \frac{\Gamma(n+1/2) \sqrt{2}}{\Gamma(n+1)} \quad (2)$$

چرخه اتو کوانتومی دارای چهار فرآیند می باشد که به شرح زیر است:

فرآیند $A \otimes B$: فرآیند انبساط بی دررو است که در آن ماده کار در تماس با هیچ کدام از حمام های گرمایی نیست. در طول این فرآیند هامیلتونی سامانه با تغییر فرکانس و افزودن تابع دلتا در مرکز پتانسیل نوسانگر هماهنگ، از

$$H_c = \frac{p^2}{2m} + \frac{1}{2} m \omega_c^2 x^2 + V_0 d(x) \quad \text{به} \quad H_h = \frac{p^2}{2m} + \frac{1}{2} m \omega_h^2 x^2$$

می کند به نحوی که احتمال اشغال ترازهای انرژی تغییر نکرده و با احتمال اشغال ترازهای انرژی در نقطه A برابر است. دلیل این نوع تعریف برای فرآیند بی دررو را می توان این گونه شرح داد؛ با توجه به اینکه انرژی درونی برابر است با $U = \sum_n p_n E_n$ ،

که در اینجا p_n احتمال اشغال تراز n ام با انرژی E_n می باشد، تغییرات انرژی درونی را می توان به صورت $dU = \sum_n p_n dE_n + \sum_n E_n dp_n$ نوشت. از طرف دیگر، طبق

قانون اول ترمودینامیک تغییرات انرژی درونی، dU ، برابر با جمع گرمای مبادله شده، dQ و کار انجام شده، dW ، است. از این رو در ترمودینامیک کوانتومی، گرمای مبادله شده را می توان برابر با $dQ = \sum_n E_n dp_n$ و کار انجام شده را برابر با

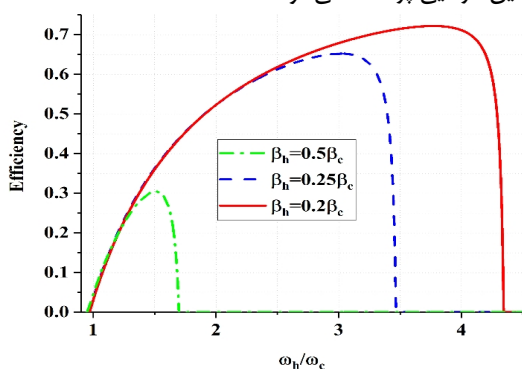
$$dW = \sum_n p_n dE_n$$

در نظر گرفت. حال با توجه به اینکه در فرآیند بی دررو هیچ گرمایی مبادله نمی شود، کل تغییرات انرژی درونی به صورت کار خواهد بود. به عبارتی کاری که در این فرآیند انجام می شود از طریق تغییر در ترازهای انرژی سامانه بدون تغییر در احتمال اشغال آن ها به دست می آید.

فرآیند $B \otimes C$: فرآیند هم حجم گرماده است که در آن ماده کار در تماس با حمام سرد قرار دارد. در طول این فرآیند هامیلتونی سامانه بدون تغییر باقی می ماند و تنها احتمال اشغال ترازهای انرژی تغییر می کنند. در طی این فرآیند هیچ کاری انجام نمی شود، بنابراین $dU = \sum_n p_n dE_n$ و با توجه به قانون

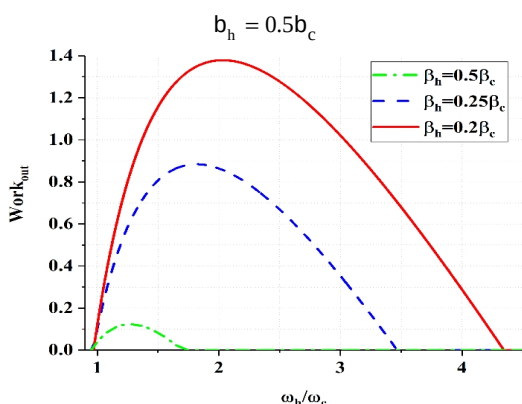
اول ترمودینامیک کل تغییرات انرژی درونی به صورت گرما داده شده به حمام سرد خواهد بود، به عبارتی گرمایی که در این فرآیند از دست داده می شود از اختلاف انرژی درونی نقاط انتهایی

ماشین اتو کوانتومی بر حسب تغییرات w_h/w_c برای پارامترهای $V_0 = 0, 0.5, 1, 1.5$ و $b_h = 0.25b_c$ رسم شده است. به ازای $V_0 = 0$ برای $w_h/w_c \leq 1$ کار خالص انجام شده و بازده صفر است، در حالی که به ازای $V_0 \neq 0$ برای $w_h/w_c \leq 1$ کار خالص انجام شده و بازده غیر صفر خواهد داشت. به علاوه می توان از شکل 2 دریافت که برای V_0 های در نظر گرفته شده در بازه تقریبی $0.95 \leq w_h/w_c \leq 1.6$ با افزایش V_0 کار خالص انجام شده افزایش می یابد، اما با توجه به شکل (ب)-2 در بازه تقریبی $w_h/w_c > 1.6$ با افزایش V_0 کار خالص انجام شده کاهش می یابد، همان طور که در شکل 3 دیده می شود در بازه تقریبی $0.95 \leq w_h/w_c \leq 3$ با افزایش V_0 بازده نیز افزایش می یابد اما در بازه تقریبی $w_h/w_c > 3$ با افزایش V_0 بازده کاهش پیدا می کند. علت صفر شدن بازده بعد از بازه فرکانسی $\frac{w_h}{w_c} > 4$ این است که این ماشین در محدوده ماشین گرمایی قرار ندارد یعنی اینکه در بازه گفته شده $Q_c > 0$ و $Q_h > 0$ هستند، در صورتی که شرط ماشین گرمایی بودن این است که $Q_c < 0$ و $Q_h > 0$ باشند، که در این مقاله فقط به بررسی ماشین گرمایی پرداخته می شود.



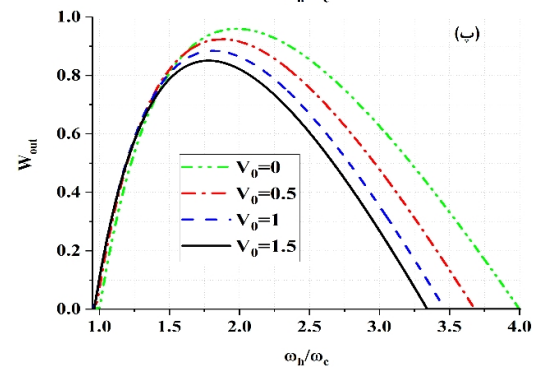
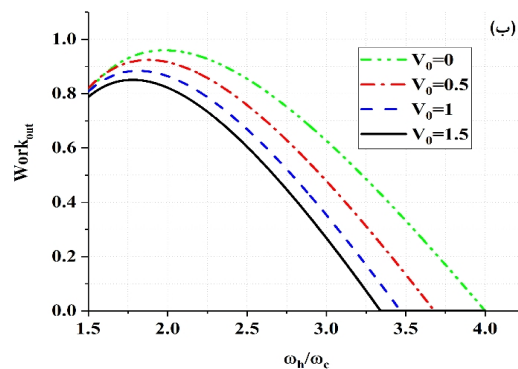
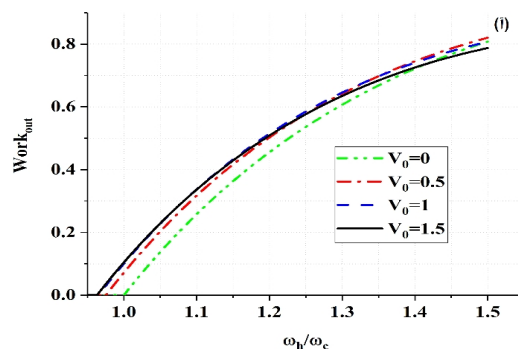
شکل 4. نمودار بازده ماشین اتو کوانتومی بر حسب پارامتر بدون بعد

w_h/w_c برای پارامترهای $V_0 = 1$ ، $b_h = 0.2b_c$ ، $b_h = 0.25b_c$ و $b_h = 0.5b_c$



شکل 5. نمودار کار خالص ماشین اتو کوانتومی بر حسب پارامتر بدون بعد

w_h/w_c برای پارامترهای مشابه با شکل 4

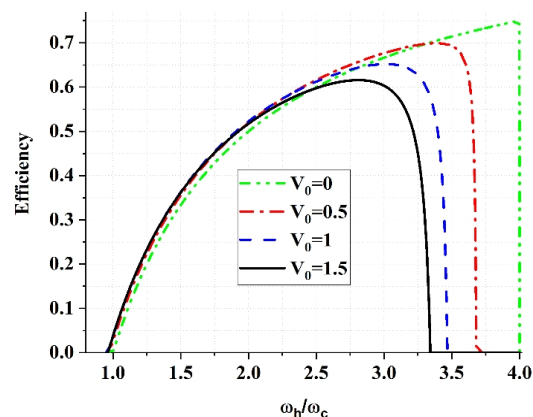


شکل 2. نمودار کار خالص ماشین اتو کوانتومی بر حسب پارامتر بدون بعد

w_h/w_c (ا) $1.5 \leq w_h/w_c \leq 4$ (ب) $0.95 \leq w_h/w_c \leq 1.5$ (پ)

$0.95 \leq w_h/w_c \leq 4$ برای پارامترهای $b_h = 0.25b_c$ ، $V_0 = 0$ ،

$V_0 = 1.5$ و $V_0 = 1$ ، $V_0 = 0.5$



شکل 3. نمودار بازده ماشین اتو کوانتومی بر حسب پارامتر بدون بعد

w_h/w_c برای پارامترهای مشابه با شکل 2

در شکل های 2 و 3، نمودار کار خالص انجام شده و بازده

برای U عملگر $Z_h = \text{Tr}(\exp(-b_h H_h))$ تابع پارش و عملگر U برای حمام همدوس گرمایی همان عملگر جابه‌جایی $D(a) = \exp(a a^\dagger - a^\dagger a)$ (برای حمام چلانده گرمایی

همان عملگر چلانده $(S(x) = \exp \frac{\alpha}{\epsilon^2} (x^\dagger a^2 - x a^{\dagger 2})) \frac{\partial}{\partial}$

می‌باشد [17]. در اینجا $a = |a| e^{iq}$ پارامتر همدوسی $x = re^{iq}$ پارامتر چلانده می‌باشد، در این پژوهش پارامتر q صفر در نظر گرفته شده است. در این فرآیند هیچ کاری انجام نمی‌شود، در حالی که گرمای گرفته شده از حمام را می‌توان به صورت اختلاف انرژی درونی نقاط انتهایی و ابتدایی این فرآیند، $Q_{D \otimes A} = \text{Tr}((r_A - r_D) H_h)$ محاسبه کرد.

در فرآیند سوم در ابتدا حالت سامانه به حالت گرمایی $r_{th} = U^\dagger r_A U$ تبدیل می‌شود و سپس به وسیله فرآیند بی‌دررو هامیلتونی سامانه به مقدار اولیه H_c باز می‌گردد. ماتریس چگالی نقطه B را می‌توان به صورت $|n\rangle_c \langle n| = Z_h^{-1} \hat{a} \exp(-b_h E_{n,h})$ نوشت، که در آن H_c ویژه حالت‌های هستند و همچنین می‌توان کار انجام شده در طول این فرآیند را به صورت اختلاف انرژی درونی نقاط انتهایی و ابتدایی این فرآیند، $W_{A \otimes B} = \text{Tr}(r_B H_c) - \text{Tr}(r_A H_h)$ به‌دست آورد.

در آخر چرخه اتو با فرآیند $B \otimes C$ که یک فرآیند هم‌حجم است به نقطه آغازین خود باز می‌گردد. در این فرآیند می‌توان گرمای داده شده به حمام گرمایی سرد را به صورت اختلاف انرژی درونی نقاط انتهایی و ابتدایی این فرآیند، $Q_{B \otimes C} = \text{Tr}((r_C - r_B) H_c)$ به‌دست آورد.

حال با استفاده از عبارات به‌دست آمده برای کار و گرما، می‌توان بازده ماشین اتو کوانتومی را به صورت زیر محاسبه نمود:

$$h_{\text{Otto}} = \frac{Q_{D \otimes A} + Q_{B \otimes C}}{Q_{D \otimes A}} \quad (6)$$

باید به این نکته توجه شود که برای محاسبه بازده و کار خالص انجام شده می‌بایست مقدار میانگین انرژی در چهار نقطه چرخه اتو را به‌دست آورد. همان طور که قبلاً به آن اشاره شد در نقطه A ماده‌کار در تماس با حمام همدوس گرمایی (چلانده گرمایی) قرار دارد. با توجه به ماتریس چگالی نقطه A که در بالا آمده است می‌توان مقدار میانگین انرژی در این نقطه را وقتی که حمام، حمام همدوس گرمایی باشد به صورت زیر به‌دست آورد [12]:

در شکل‌های 4 و 5، نمودار کار خالص انجام شده و بازده ماشین اتو کوانتومی بر حسب تغییرات w_h / w_c برای پارامترهای $b_h = 0.5b_c$ و $b_h = 0.25b_c$ ، $b_h = 0.2b_c$ ، $V_0 = 1$ شده است. با توجه به این شکل‌ها می‌توان دید که هر چه اختلاف دمای بین دو منبع از هم بیشتر شود کار خالص انجام شده و بازده ماشین اتو کوانتومی بهبود پیدا می‌کند.

ماشین اتو کوانتومی در تماس حمام غیر گرمایی

در این بخش بازده و کار خالص انجام شده ماشین اتو کوانتومی که بین دو حمام، یکی حمام گرمایی سرد در معکوس دمایی $b_c = 1/k_B T_c$ و دیگری حمام همدوس گرمایی (چلانده گرمایی) در معکوس دمایی $b_h = 1/k_B T_h$ عمل می‌کند بررسی می‌شود.

چرخه اتو شامل چهار فرآیند است و حالت‌های سامانه در نقاط مختلف چرخه با هم متفاوت هستند. با توجه به شکل 1 توضیح چرخه اتو را از نقطه C آغاز می‌کنیم. در این نقطه ماده‌کار در تعادل با حمام گرمایی سرد قرار دارد. هامیلتونی

$$H_c = \frac{p^2}{2m} + \frac{1}{2} m \omega_c^2 x^2 + V_0 d(x)$$

و ماتریس چگالی آن برابر با $r_c = Z_c^{-1} \exp(-b_c H_c)$ است، که در اینجا $Z_c = \text{Tr}(\exp(-b_c H_c))$ تابع پارش است. اولین فرآیند $C \otimes D$ یک فرآیند بی‌دررو است که در آن ماده‌کار از حمام گرمایی سرد جدا می‌شود. در طول این فرآیند هامیلتونی سامانه به طور بی‌دررو از H_c به

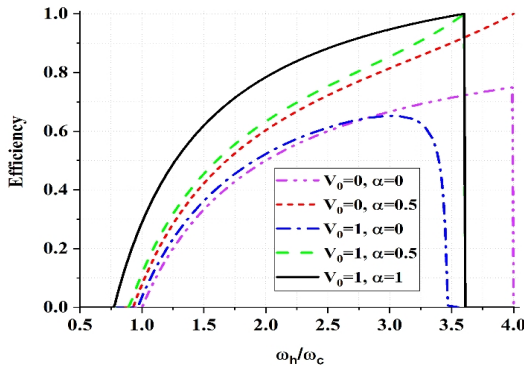
$$H_h = \frac{p^2}{2m} + \frac{1}{2} m \omega_h^2 x^2$$

اشغال ترازهای انرژی سامانه بدون تغییر باقی می‌مانند. حالت ماده‌کار در نقطه D را می‌توان به صورت $|n\rangle_h \langle n| = Z_h^{-1} \hat{a} \exp(-b_h E_{n,h})$ نوشت که در آن

$|n\rangle_h$ ویژه حالت‌های H_h هستند. در این فرآیند ماده‌کار در تماس با هیچ کدام از حمام‌های گرمایی نیست و همچنین در این فرآیند آنتروپی ثابت است، در حالی که کار انجام شده در طول این فرآیند را می‌توان به صورت اختلاف انرژی درونی نقاط انتهایی و ابتدایی این فرآیند،

$$W_{C \otimes D} = \text{Tr}(r_D H_h) - \text{Tr}(r_C H_c)$$

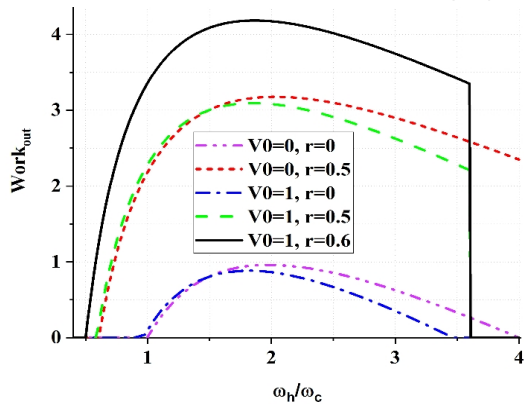
دومین فرآیند $D \otimes A$ یک فرآیند هم‌حجم است که در آن هامیلتونی ماده‌کار ثابت باقی می‌ماند. در این فرآیند ماده‌کار در تماس با حمام همدوس گرمایی (چلانده گرمایی) قرار دارد تا زمانی که حالت آن به حالت همدوس گرمایی (چلانده گرمایی) تغییر کند. حالت سامانه در نقطه A را به صورت $r_A = U Z_h^{-1} \exp(-b_h H_h) U^\dagger$



شکل 7. نمودار بازده بر حسب پارامتر بدون بعد W_h / W_c برای

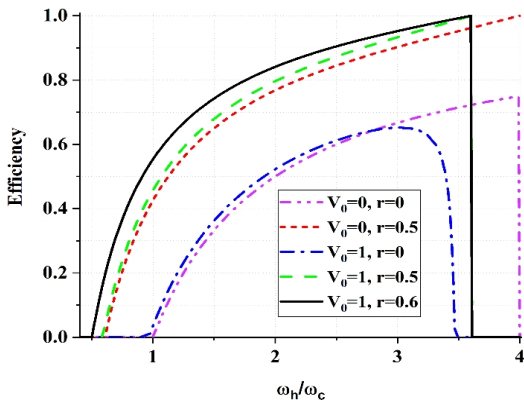
پارامترهای $b_h = 0.25b_c$ و $a = 0, 0.5, 1$ ، $V_0 = 0, 1$

در شکل‌های 6 و 7 نمودار کار خالص انجام شده و بازده ماشین اتو کوانتومی در شرایط مختلف رسم شده است. با توجه به این شکل‌ها می‌توان مشاهده کرد که ماشین اتو کوانتومی که در تماس با حمام همدوس گرمایی قرار دارد باعث بهبود بازده و کار خالص نسبت به همتای خود، که در تماس با حمام گرمایی قرار گرفته است، می‌شود. همچنین می‌توان دید که با افزایش پارامتر همدوسی (a) بازده و کار خالص انجام شده نیز افزایش می‌یابد.



شکل 8. نمودار کار خالص بر حسب پارامتر بدون بعد W_h / W_c برای

پارامترهای $b_h = 0.25b_c$ و $r = 0, 0.5, 0.6$ ، $V_0 = 0, 1$



شکل 9. نمودار بازده بر حسب پارامتر بدون بعد W_h / W_c برای

پارامترهای $b_h = 0.25b_c$ و $r = 0, 0.5, 0.6$ ، $V_0 = 0, 1$

در شکل‌های 8 و 9 نمودار کار خالص انجام شده و بازده

$$\begin{aligned} \langle H_h \rangle_A &= \text{Tr} \left[\hat{H}_h r_A \hat{\rho} \right] \\ &= \text{Tr} \left[\hat{H}_h D(a) r_{th} D(a)^\dagger \hat{\rho} \right] \\ &= \langle H_h \rangle_{th} + \hbar \omega |a|^2 \end{aligned} \quad (7)$$

حال اگر حمام، حمام چلانده گرمایی باشد مقدار میانگین انرژی در نقطه A را می‌توان به صورت زیر به دست آورد [14]:

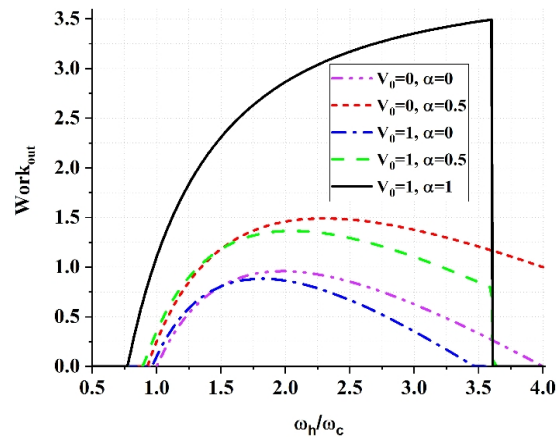
$$\begin{aligned} \langle H_h \rangle_A &= \text{Tr} \left[\hat{H}_h r_A \hat{\rho} \right] \\ &= \text{Tr} \left[\hat{H}_h S(x) r_{th} S(x)^\dagger \hat{\rho} \right] \\ &= \hbar \omega \langle N \rangle_{th} \cosh(2r) \\ &\quad + \hbar \omega \sinh(r)^2 + \frac{\hbar \omega}{2} \end{aligned} \quad (8)$$

با توجه به دو رابطه (7) و (8)، می‌توان گرمای جذب شده توسط چرخه در فرآیند هم‌حجم $D \rightarrow A$ در دو حالت حمام همدوس گرمایی و چلانده گرمایی را به ترتیب به صورت زیر به دست آورد:

$$Q_{D \rightarrow A} = \langle H_h \rangle_{th} - \langle H_h \rangle_D + \hbar \omega |a|^2 \quad (9)$$

$$Q_{D \rightarrow A} = \hbar \omega \left[\langle N \rangle_{th} \cosh(2r) - \frac{\langle H_h \rangle_D}{\hbar \omega} + \sinh(r)^2 + \frac{1}{2} \right] \quad (10)$$

با توجه به دو رابطه (9) و (10)، می‌توان مشاهده کرد که در حد $r \rightarrow 0$ و $a \rightarrow 0$ گرمای جذب شده همان گرمای جذب شده رابطه (3) خواهد بود.



شکل 6. نمودار کار خالص بر حسب پارامتر بدون بعد W_h / W_c برای

پارامترهای $b_h = 0.25b_c$ و $a = 0, 0.5, 1$ ، $V_0 = 0, 1$

انجام شده غیر صفر وجود خواهد داشت. به کار بردن نوسانگر هماهنگ ساده به اضافه سد دلتا در مرکز آن به عنوان ماده کار، در محدوده فرکانسی که نسبت فرکانس حمام گرم به حمام سرد کوچکتر از $1/6$ باشد با افزایش قدرت سد، کار خالص انجام شده افزایش می یابد. اما اگر نسبت فرکانس حمام گرم به حمام سرد بزرگتر از $1/6$ باشد با افزایش قدرت سد، کار خالص انجام شده کاهش پیدا می کند. همچنین می توان مشاهده کرد تقریباً اگر فرکانس حمام گرم به حمام سرد 3 باشد با افزایش قدرت سد، بازده افزایش می یابد در حالی که تقریباً اگر فرکانس حمام گرم به حمام سرد بیشتر از 3 باشد با افزایش قدرت سد، بازده کاهش می یابد. به کار بردن منبع غیر گرمایی (چلانده گرمایی یا همدوس گرمایی) به جای منبع گرمایی در ماشین اتو کوانتومی باعث افزایش بازده و کار خالص انجام شده خواهد شد. به عبارتی با افزایش پارامتر چلانده گی یا همدوسی، بازده و کار خالص انجام شده این ماشین افزایش می یابد.

References

- [1] Sayyaadi, H. (2020). Modeling, assessment, and optimization of energy systems. Academic press.
- [2] Callen, H. B. (1991). Thermodynamics and Introduction to Thermostatistics. John miley & sons.
- [3] Quan, H.T., Liu, Y.X., Sun, C. P., & Nori, F. (2007). Quantum thermodynamic cycle and quantum heat engines. Phys. Rev. E, 76(3), 031105.
- [4] Gelbwaser-Klimovsky, D., Bylinskii, A., Gangloff, D., Islam, R., Aspuru-Guzik, A., & Vuletic, V. (2018). Single-atom heat machines enabled by energy quantization. Phys. Rev. Lett., 120(7), 170601.
- [5] Levy, A., & Gelbaser-Kilmovsky, D. (2018). Quantum features and signatures of quantum thermal machines. Thermodynamics in Quantum Regime: Fundamental Aspects and New Directions, 87-126.
- [6] Abah, O., Rossangel, J., Jacob, G., Deffner, S., Schmidt-Kaler, F., Singer, K., & Lutz, E. (2012). Single-ion heat engine at maximum power. Phys. Rev. Lett., 109(20), 203006.
- [7] Roßnagel, J., Dawkins, S. T., Tolazzi, K. N., Abah, O., Lutz, E., Schmidt-Kaler, F., & Singer, K. (2016). A single-atom heat engine. Science, 352(6283), 325-329.
- [8] Zhang, K., Barini, F., & Meystre, P. (2014). Quantum optomechanical heat engine. Phys.

ماشین اتو کوانتومی در شرایط مختلف رسم شده است، با توجه به این شکل ها می توان مشاهده نمود که ماشین اتو کوانتومی که در تماس با حمام چلانده گرمایی قرار دارد باعث افزایش کار خالص انجام شده و بازده نسبت به همتای خود، که در تماس با حمام گرمایی است، خواهد شد. همچنین می توان دید که با افزایش پارامتر چلانده گی (r) بازده و کار خالص انجام شده نیز افزایش می یابد.

بحث و نتیجه گیری

در ماشین اتو کوانتومی با به کار بردن نوسانگر هماهنگ ساده به عنوان ماده کار، می توان بازدهی مشابه با همتای کلاسیکی آن تولید کرد. در حالی که اضافه شدن سد دلتا به مرکز نوسانگر باعث ایجاد ناهمسانی در سطوح انرژی و در نتیجه تولید بازده بیشتری نسبت به همتای کلاسیکی آن خواهد شد. به عنوان مثال در محدوده ای که فرکانس منبع گرم کوچکتر از فرکانس منبع سرد است، بازده و کار خالص انجام شده برای نوسانگر هماهنگ ساده صفر خواهد بود ولی برای نوسانگر هماهنگ ساده به اضافه سد دلتا، بازده و کار خالص

Rev. Lett., 112(15), 150602.

- [9] Elouard, C., Richard, M., & Auffeves, A. (2015). Reversible work extraction in a hybrid opto-mechanical system. New J. phys., 17(5), 055018.
- [10] Niskanen, A. Q., Nakamura, Y., & Pekola, J. P. (2007), Information entropic superconducting microcooler. Phys. Rev. B, 76(17), 174523.
- [11] Cakmak, S., Altintas, F., & E. Müstecaplioglu, Ö. (2016). Lipkin-Meshkov-Glick model in a quantum Otto cycle, Eur. Phys. J., 131, 1-9.
- [12] Niedenzu, W., Gelbwaser-Klimovsky, D., Kofman, A. G., & Kurizki, G. (2016). On the operation of machines powered by quantum non-thermal baths. New J. phys., 18(8), 083012.
- [13] Manzano, G., Galve, F., Zambrini, R., & Parrondo, J. M. (2016). Entropy production and thermodynamic power of the squeezed thermal reservoir. Phys. Rev. E, 93(5), 052120.
- [14] Manzano, G. (2018). Squeezed thermal reservoir as a generalized equilibrium reservoir. Phys. Rev. E, 98(4), 042123.
- [15] Roßnagel, J., Abah, O., Schmidt-Kaler, F., Singer, K., & Lutz, E. (2014). Nanoscale heat engine beyond the Carnot limit. Phys. Rev. Lett., 112(3), 030602.
- [16] Patil, S. H. (2006). Harmonic oscillator with a δ -function potential. Eur. J. phys., 27(4), 899.
- [17] Scully, M. O., & Zubairy, M. S. (1999). Quantum Optics.