

Effects of interaction between nanopore and polymer on translocation time

Rouhollah Abdolvahab*, Mohammadreza Niknam Hamidabad

Department of Physics, Faculty of Science, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

Received: 09.10.2018 Final revised: 29.09.2019 Accepted: 28.12.2019

DOI: [10.22055/JRMBS.2020.15558](https://doi.org/10.22055/JRMBS.2020.15558)

Abstract

Here using LAMMPS molecular dynamics (MD) software, we simulate polymer translocation in 2 dimensions. We do the simulations for weak and moderate forces and different pore diameters. Our results show that in both non-equilibrium and equilibrium initial conditions, translocation time will always increase by increasing binding energy and or increasing pore diameter. Moreover, scaling exponent of time versus force is -0.9531 in accordance to our predecessors. The comparison between equilibrium and non-equilibrium initial condition shows that the translocation time is very sensitive to the initial condition. Translocation time of the relaxed polymers for interaction energy of $8k_B T$ is smaller from the non-equilibrium case even in the small energy of $1k_B T$. Moreover, our simulation results show that the translocation velocity decrease by increasing the nanopore diameter from 3σ to 5σ , where σ is the size of a monomer.

Keywords: Polymer Translocation, Nanopore, Molecular Dynamic, Binding energy

*Corresponding Author: rabdolvahab@gmail.com



اثر برهم‌کنش پلیمر و نانوحفره بر زمان عبور پلیمر از نانوحفره

روح الله عبدالوهاب*، محمدرضا نیکنام حمیدآباد

دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

دریافت: 1397/07/17 ویرایش نهائی: 1398/07/07 پذیرش: 1398/09/29

DOI: 10.22055/JRMBS.2020.15558

چکیده

در این مقاله، عبور با استفاده از نیروی وارد به پلیمر را با استفاده از نرم افزار دینامیک مولکولی LAMMPS به صورت 2بعدی را، شبیه‌سازی و به بررسی تأثیر برهم‌کنش پلیمر و دیواره نانوحفره بر زمان عبور می‌پردازیم. این بررسی را برای نیروهای ضعیف و متوسط و برای قطرهای مختلف نانوحفره انجام می‌دهیم. این شبیه‌سازی با دو حالت متفاوت تعادلی و غیر تعادلی آغاز می‌شود. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که در هر دو حالت تعادلی و غیر تعادلی، زمان عبور پلیمر همواره با افزایش انرژی چسبندگی و قطر نانوحفره افزایش می‌یابد. به علاوه نمای زمان عبور برحسب نیرو -0.9531 به دست آمد که تطابق خوبی با نمونه‌های پیشین دارد.

کلیدواژگان: پلیمر، نانوحفره، شبیه‌سازی دینامیک مولکولی، عبور پلیمر

مقدمه

ورود پروتئین به سمت مورد نظر، پروتئینی به نام چپرون، به آن چسبیده و از بازگشت پروتئین جلوگیری می‌کند [10-15]. با این حال در درون آزمایشگاه، در میان روش‌های مختلف عبور پلیمر از درون نانوحفره، عبور با کمک یک میدان نیروی خارجی، یکی از معمول‌ترین روش‌های آزمایشگاهی و رویکردهای محاسباتی است [9 و 16-23].

در فرایند عبور با کمک میدان خارجی، پارامترهای گوناگونی مانند، نیروی خارجی، طول حفره، قطر حفره، طول پلیمر، میزان شلوغی محیط، و غیره بررسی می‌شوند. یکی از پارامترهای مهم در اینجا، انرژی چسبندگی بین دیواره حفره و پلیمر است، که در این کار مورد بررسی قرار گرفته است.

عبور بیوپلیمرها از درون نانوحفره، یکی از فرآیندهای بسیار پرتکرار در بیولوژی و بیوتکنولوژی است. عبور پروتئین از غشای سلولی، عبور RNA از نانومنافذ هسته و تزریق RNA به سلول میزبان توسط یک ویروس، برخی از این مواردند [1 و 2]. به علاوه، این فرآیند، شامل کاربردهای فناورانه‌ای مانند دارورسانی کنترل شده [3] و توالی‌یابی DNA [4 و 5] و جداسازی پلیمرها [6] نیز می‌باشد. بر این اساس عبور پلیمر از نانوحفره یکی از فعال‌ترین رشته‌های کاری در بیوفیزیک و ماده چگال نرم است [7-9].

در درون موجودات زنده، عبور پلیمر با کمک چپرون، یکی از شیوه‌های مهم حرکت پلیمرها است. در این روش، که در سلول‌ها استفاده می‌شود [10]، به محض

*نویسنده مسئول: rabdolvhahab@gmail.com

باز نشر این مقاله با ذکر منبع آزاد است.

این مقاله تحت مجوز کپی‌رایت کامنز تخصصی 4.0 بین‌المللی می‌باشد



$$\vec{F}_i^F = -\xi \vec{V}_i \quad 4$$

که در آن ξ ضریب اصطکاک است.

در مورد نیروهای پایستار [7]:

$$\vec{F}_i^C = -\vec{\nabla}(U_{LJ} + U_{FENE}) + \vec{F}_{external} \quad 5$$

$\vec{F}_{external}$ ، نیروی خارجی وارد بر پلیمر در درون نانوحفره را نشان می‌دهد:

$$\vec{F}_{external} = F\hat{x} \quad 6$$

جهت نیرو در راستای محور نانوحفره و به سمت حرکت پلیمر، است.

شرایط اولیه و پارامترهای شبیه‌سازی

نانوحفره طولی برابر 6σ دارد، که σ طول یک مونومر است و ما حفره‌هایی با قطرهای 3، 4 و 5 را بررسی کرده‌ایم. اولین مونومر در انتهای نانوحفره قرار گرفته است. بقیه مونومرهای نسبت به هم در تعادل قرار گرفته‌اند ولی در یک زنجیره مستقیم هستند. در شرط اولیه غیر تعادلی مستقیم شبیه‌سازی را آغاز می‌کنیم ولی در شرط اولیه تعادلی، به پلیمر زمان می‌دهیم تا به تعادل برسد و سپس شبیه‌سازی را آغاز می‌کنیم. در این به تعادل رسیدن مونومرهای داخل کانال، ثابت در نظر گرفته می‌شوند. زمان این بخش نسبت به کل شبیه‌سازی در حدود 20 تا 40 درصد برای سریعترین تا کندترین پلیمرها زمان می‌برد. برای کاهش خطای میانگین زمان عبور، این فرایند دست کم 1000 بار تکرار شده است. برای بررسی رسیدن به تعادل از شعاع چرخش استفاده شده است. میزان این شعاع برحسب زمان محاسبه می‌شود و تا جایی ادامه می‌یابد که حول مقدار ثابتی نوسان کند.

در شبیه‌سازی، ما عبور پلیمر را در دو شرط اولیه متفاوت تعادلی و غیر تعادلی و دست کم در 8 انرژی برهم کنش متفاوت مورد بررسی قرار داده‌ایم. به علاوه، 3 اندازه متفاوت برای قطر حفره نیز بررسی شده است. در ادامه، ابتدا به مروری بر تئوری مسأله می‌پردازیم. سپس گزارش و تحلیلی از نتایج شبیه‌سازی خواهیم داشت. نهایتاً، کارمان را با یک نتیجه‌گیری بر مبنای خروجی‌های شبیه‌سازی به پایان می‌رسانیم.

مدل نظری

ما پلیمر را به عنوان زنجیره‌ای از جرم‌ها و فنرها در نظر گرفته‌ایم. بین هر دو مونومر کناری پتانسیل فته¹ برقرار است (معادله 1). میان تمامی مونومرها پتانسیل لنارد-جونز² نیز در نظر گرفته شده است [7].

$$U_{FENE} = -\frac{1}{2} kR_0^2 \ln\left(1 - \frac{r^2}{R_0^2}\right) \quad 1$$

$$U_{LJ} = 4\epsilon \left[\left(\frac{\sigma}{r}\right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r}\right)^6 \right] + \epsilon \Leftrightarrow r \leq r_{cut} \quad 2$$

R_0 بیشینه فاصله مجاز بین مونومرهای کناری و k ثابت فنر است. σ ، اندازه مونومر، ϵ عمق چاه پتانسیل و r_{cut} شعاع قطع مؤثر پتانسیل لنارد-جونز هستند. پتانسیل لنارد-جونز همچنین میان دیواره حفره مونومرها با یک شعاع قطع متفاوت در نظر گرفته شده است.

ما برای شبیه‌سازی از دینامیک لانژون استفاده کرده‌ایم.

در این روش برای هر مونومر، می‌توان نوشت:

$$m\ddot{r}_i = \vec{F}_i^C + \vec{F}_i^F + \vec{F}_i^R \quad 3$$

که در آن m جرم مونومر، F_i^C ، نیروی پایستار، F_i^F ، نیروی اصطکاک و F_i^R نیروهای کاتوره ای وارد بر مونومر i ام را نشان می‌دهند. به صورت زیر با سرعت هر مونومر مرتبط است [7]:

² Lennard-Jones

¹ FENE: Finitely Extensible Nonlinear Elastic

قرار می‌دهیم [13]. به علاوه پارامتر انرژی $\varepsilon = k_B T$ در نظر گرفته شده است.

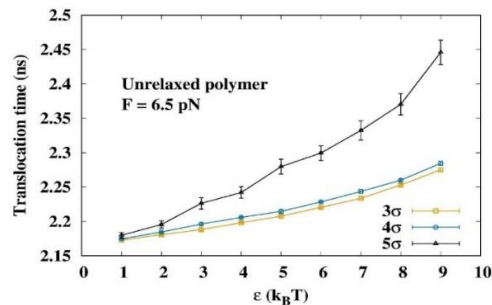
ضریب اصطکاک برابر $\xi = 0.7 \frac{m}{t_{LJ}}$ و پارامترهای پتانسیل فته، $R_0 = 1.5\sigma$ ، $k = 40 \frac{\varepsilon}{\sigma^2}$ و جرم هر مونومر $m = 70 amu$ فرض شده‌اند [22].

نتیجه‌گیری و بحث

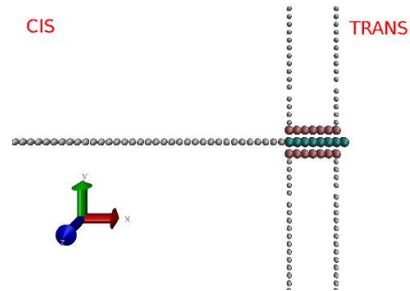
بنا به شرایط اولیه تعادلی و غیر تعادلی، نتایج به صورت زیر ارائه می‌شود.

حالت غیر تعادلی

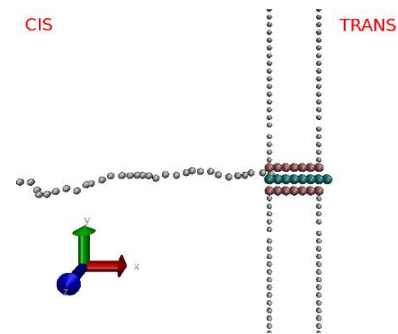
بنا بر کارهای انجام شده، افزایش انرژی چسبندگی، همواره زمان عبور را در حالت غیر تعادلی افزایش می‌دهد [12 و 11 و 9 و 4]. به علاوه، نتایج شبیه‌سازی، نشان می‌دهد که افزایش قطر حفره از 3 به 4 و سپس 5σ ، همواره به افزایش میانگین زمان عبور در هر دو نیروی ضعیف و متوسط می‌انجامد (شکل‌های 3 و 4).



شکل 3. میانگین زمان عبور پلیمر در حالت غیر تعادلی برحسب انرژی چسبندگی در 3 قطر حفره 3، 4، و 5 و برای نیروی متوسط $6.5 pN$ بر روی بیش از 1000 نمونه رسم شده است.



شکل 1. شرایط اولیه برای حالت غیر تعادلی برای پلیمری با طول 50 و قطر کانال 5 (واحد طول σ در نظر گرفته شده است).



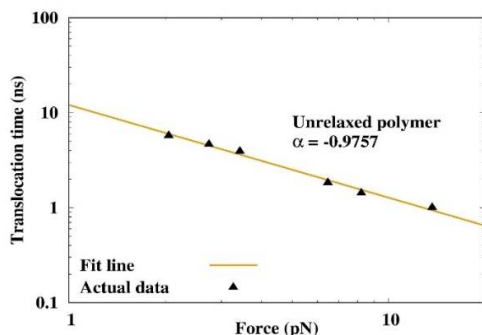
شکل 2. شرایط اولیه برای حالت تعادلی برای پلیمری با طول 50 و قطر کانال 5 (واحد طول σ در نظر گرفته شده است). واحد زمان شبیه‌سازی از رابطه:

$$t_{LJ} = \left(\frac{m\sigma^2}{\varepsilon} \right)^{\frac{1}{2}} \quad 7$$

به دست آمده است و در حدود 10 فمتوثانیه است. در اینجا ما از دو نیروی خارجی ضعیف و متوسط برای شبیه‌سازی استفاده کرده‌ایم. نیروی متوسط از رابطه زیر برآورد می‌گردد:

$$\frac{k_B T}{\sigma N^{\nu}} \leq F \leq \frac{k_B T}{\sigma} \quad 8$$

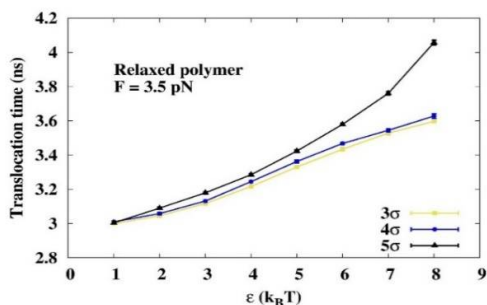
که در آن، ν نامار فلوری و N تعداد کل مونومرها هستند. در کار ما که طول مونومرها برابر 50 در نظر گرفته شده است، ما برای نیروهای ضعیف و متوسط به ترتیب از نیروهای $3/5$ و $6/5$ پیکونیوتن استفاده کرده‌ایم. شعاع قطع مؤثر برای دیواره حفره برابر 2σ و در باقی موارد $2^{1/6}\sigma$ در نظر گرفته شده است. با قرار دادن شعاع قطع $r_{cut} = 2^{1/6}\sigma$ ، ما از برهم‌کنش‌های جاذب صرف نظر کرده و پلیمر را در یک حلال خوب



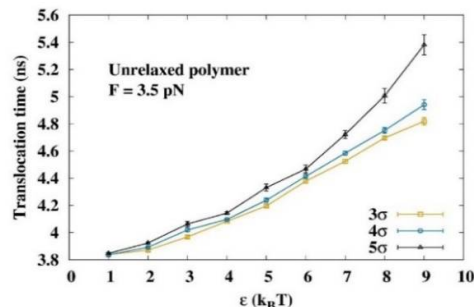
شکل 5. میانگین زمان عبور پلیمر در حالت غیر تعادلی برحسب نیرو در نیروهای متوسط و در محورهای لگاریتمی رسم شده است. نمای مقیاس در شکل نشان داده شده است.

حالت تعادلی

در شرایط اولیه تعادلی، نتایج برای نیروهای ضعیف مشابه نتایج حالت غیر تعادلی هستند. بنابر کارهای انجام شده، افزایش انرژی چسبندگی و قطر حفره، زمان عبور پلیمر افزایش و عبور پلیمر کند می شود (شکل 6). یک نتیجه جالب در اینجا به شیب نمودارها مرتبط است. شیب نمودار برای قطر 5، به صورت معنی داری بزرگتر از قطرهای 3 و 4 است. مهم است خاطر نشان گردد که نتایج ما برای مواردی مانند الکتروفورسیس به دست آمده اند که نیروهای عمل کننده در درون حفره وجود دارند. با این حال، در مواردی که پلیمر از یک انتها کشیده شود، افزایش قطر به آسان تر شدن عبور پلیمر می انجامد و زمان عبور را کاهش می دهد [24] که این ناقص نتایج ما نیست.



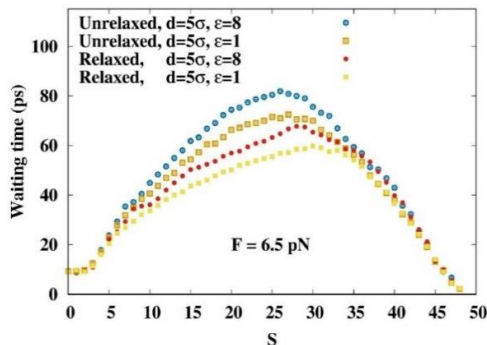
شکل 6. میانگین زمان عبور پلیمر در حالت تعادلی برحسب انرژی چسبندگی در 3 قطر حفره متفاوت 3، 4 و 5 و برای نیروی ضعیف $3.5 pN$ نشان داده شده است. میان گیری بر روی دست کم 1000 نمونه انجام شده است.



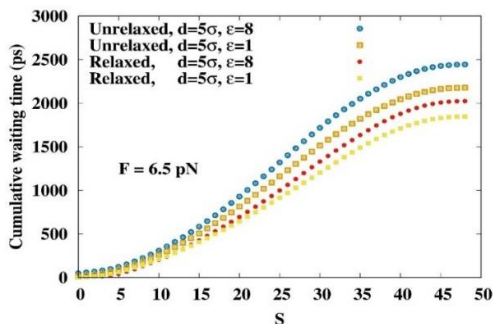
شکل 4. میانگین زمان عبور پلیمر در حالت غیر تعادلی برحسب انرژی چسبندگی در 3 قطر حفره 3، 4، و 5 و برای نیروی ضعیف $3.5 pN$ بر روی بیش از 1000 نمونه رسم شده است.

مقایسه شکل های 3 و 4 نشان می دهد که میانگین زمان عبور پلیمر، در نیروهای ضعیف به صورت قابل توجهی بزرگتر از میانگین زمان عبور در نیروهای متوسط است. البته این افزایش با توجه به کاهش نیروی مؤثر قابل انتظار است. به علاوه اختلاف میان زمان عبور پلیمر در قطر 5 با قطرهای کوچک تر، با افزایش نیرو از ضعیف به متوسط، افزایش می یابد.

زمان عبور پلیمر با افزایش نیروی خارجی کاهش می یابد. این تغییر در نیروهای متوسط به ما کمک می کند تا یک نمای مقیاس محاسبه نماییم. ما زمان عبور را برحسب نیرو برای نیروهای ضعیف در محورهای لگاریتمی رسم کردیم. این نتایج که در شکل 5 نشان داده شده است، نمای مقیاس -0.9757 را به ما نشان می دهد. در این شبیه سازی ها، انرژی چسبندگی $\epsilon = 6$ ، قطر حفره برابر 4 و طول پلیمر برابر 50 مونومر است. این پارامتر در ادبیات تنها برای حالت اولیه تعادلی محاسبه شده است [17، 21].

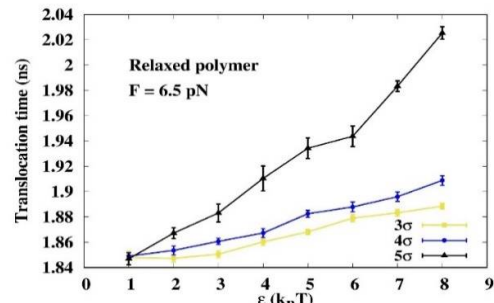


شکل 9. نمودارهای زمان انتظار برای هر دو حالت ابتدایی تعادل و غیر تعادلی و در 2 انرژی چسبندگی متفاوت 1 و 8، برای حفره با قطر 5 با هم مقایسه شده‌اند.



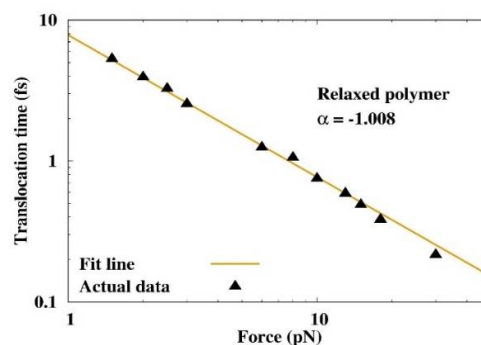
شکل 10. نمودارهای زمان انتظار تجمعی برای هر دو حالت ابتدایی تعادل و غیر تعادلی و در 2 انرژی چسبندگی متفاوت 1 و 8، برای حفره با قطر 5 با هم مقایسه شده‌اند.

زمان انتظار عبور پلیمر از حفره با قطر 5 و برای هر دو شرط اولیه تعادلی و غیر تعادلی، و برای 2 انرژی چسبندگی 1 و 8 در شکل 9 مقایسه شده‌اند. شکل 3 مرحله برای عبور پلیمر را نشان می‌دهد. به دلیل فضای خالی سمت راست، اولین مونومرها به سرعت عبور می‌کنند. در ادامه، پلیمرهای میانی تا تقریباً اواسط پلیمر کند و کندتر می‌شوند. سپس سرعت عبور افزایش می‌یابد تا پلیمر کامل عبور کند. زمان تجمعی همین موارد در شکل 10 رسم شده‌اند. چنانکه از زمان‌های انتظار پیش‌بینی می‌شود، اکثر فاصله میان زمان‌های عبور در اواسط این فرایند اتفاق می‌افتد.



شکل 7. میانگین زمان عبور پلیمر در حالت تعادلی برحسب انرژی چسبندگی در 3 قطر حفره متفاوت 3، 4 و 5 و برای نیروی متوسط $6.5 pN$ نشان داده شده است. میان‌گیری بر روی دست کم 1000 نمونه انجام شده است.

ما همچنین نیروی خارجی را تغییر دادیم و میانگین زمان عبور را برحسب نیروی اعمال شده در یک نمودار لگاریتمی رسم کردیم که در شکل 8 نشان داده شده است. برازش منحنی توانی بر نمودار، نمای مقیاس -1.008 را به دست می‌دهد. در این قسمت، انرژی برهم‌کنشی $\epsilon = 6$ ، قطر حفره برابر 4 و تعداد مونومرها 50 می‌باشد. Luo و همکاران در سال 2009، نمای 1- را برای نیروهای ضعیف و متوسط گزارش داده‌اند [20]. Huopaniemi و همکاران در سال 2007 این نما را برای نیروهای ضعیف، متوسط و ضعیف -0.94 به دست آورده بودند [15] که در موافقت خوبی با نتایج محاسبات ما می‌باشند.



شکل 8. میانگین زمان عبور پلیمر در حالت تعادلی برحسب نیرو در یک نمودار لگاریتمی رسم شده است. نمای مقیاس در شکل مشخص است.

نتیجه‌گیری

ما عبور پلیمر از درون نانوحفره را با کمک شبیه‌سازی دینامیک مولکولی بررسی نمودیم. یک نیروی خارجی باعث عبور می‌گردد. به‌طور خاص ما به تأثیرات برهم‌کنش میان پلیمر و دیواره حفره در شبیه‌سازی دانه-درشت پرداخته‌ایم. نتایج شبیه‌سازی‌های ما نشان می‌دهد که در هر دو حالت شروع تعادلی و غیر تعادلی، با افزایش انرژی برهم‌کنش و یا قطر حفره، زمان عبور افزایش می‌یابد. با این وجود، شرایط اولیه بسیار مهمند. به‌عنوان مثال، زمان عبور برای پلیمر غیر تعادلی در انرژی چسبندگی 1 از زمان عبور برای پلیمر تعادلی، در انرژی 8 بیشتر است. نتایج همچنین نشان می‌دهند که با افزایش قطر نانوحفره از 3 تا 5، اختلاف میان زمان‌های عبور افزایش می‌یابند. این نتیجه می‌تواند برای جداسازی پلیمرها با کمک زمان عبورشان می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

سپاسگزاری

ما از نرم افزار دینامیک مولکولی لمپس¹ برای شبیه‌سازی استفاده کرده‌ایم [25]. همچنین از نرم افزار VMD به‌منظور نمایش گرافیکی [26] و از نرم افزار گنو پلات² برای رسم نمودارها [27] بهره گرفته شده است.

مرجع‌ها

- [1] B. Alberts, et al., *Molecular Biology of the Cell* (2002) Garland Publishing.
- [2] A. Guyton, a.J.H., *Textbook of Medical Physiology*. 7th ed. (2005) Saunders.

[3] D.C. Chang, *Guide to Electroporation and Electrofusion*. (1992) New York Academic.

[4] A. Meller, Dynamics of polynucleotide transport through nanometer-scale pores. *Journal of Physics: Condensed Matter* **15** (2003) R581-R607.
<https://doi.org/10.1088/0953-8984/15/17/202>

[5] R. Balasubramanian, et al. DNA Translocation through Hybrid Bilayer Nanopores, *The Journal of Physical Chemistry C* **123** 18 (2019) 11908-11916.
<https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.9b00399>

[6] M. Magill, E. Waller, H.W. de Haan. A sequential nanopore-channel device for polymer separation, *The Journal of chemical physics* **149** 17 (2018) 174903.
<https://doi.org/10.1063/1.5037449>

[7] M. Muthukumar, *Polymer Translocation* (2011) CRC Press.

[8] M. Muthukumar, Polymer translocation through a hole, *Journal of Chemical Physics*, **111** 22 (1999) 10371-10374.
<https://doi.org/10.1063/1.480386>

[9] V.V. Palyulin, T. Ala-Nissila, R. Metzler, Polymer translocation: the first two decades and the recent diversification, *Soft*

² GNU plot

¹ LAMMPS

- Physical Review E* **90** 4 (2014) 042708.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.90.042708>
8
- [15] W. Yu, K. Luo, *Chaperone-assisted translocation of a polymer through a nanopore*, *Journal of the American Chemical Society* **133** 34 (2011) 13565-13570.
<https://doi.org/10.1021/ja204892z>
- [16] J. Sarabadani, et al. Dynamics of end-pulled polymer translocation through a nanopore, *Europhysics Letters* **120** 3 (2018) 38004.
<https://doi.org/10.1209/0295-5075/120/38004>
- [17] I. Huopaniemi, K. Luo, T. Ala-Nissila, Langevin dynamics simulations of polymer translocation through nanopores, *Journal of Chemical Physics* **125** 12 (2006).
<https://doi.org/10.1063/1.2357118>
- [18] I. Huopaniemi, et al., Polymer translocation through a nanopore under a pulling force, *Physical Review E* **75** 6 (2007).
<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.75.061912>
2
- [19] M Magill, C. Falconer, E. Waller, H.W. de Haan, Translocation Time through a Nanopore with an Internal Cavity Is Minimal for Polymers of Intermediate Length, *Physical Review Letter* **117** 24 (2016) 247802.
- Matter* **10** 45 (2014) 9016-9037.
<https://doi.org/10.1039/C4SM01819B>
- [10] D. Tomkiewicz, N. Nouwen, A.J.M. Driessen, Pushing, pulling and trapping—Modes of motor protein supported protein translocation, *Federation of European Biochemical Societies* **581** 15 (2007) 2820–2828.
<https://doi.org/10.1016/j.febslet.2007.04.015>
5
- [11] R. Haji Abdolvahab, M.R. Eftehadi, R. Metzler, Sequence dependence of the binding energy in chaperone-driven polymer translocation through a nanopore, *Physical Review E* **83** 1 (2011) 011902.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.83.011902>
2
- [12] R. Haji Abdolvahab, Chaperone-driven polymer translocation through nanopore: Spatial distribution and binding energy, *European Physical Journal E* **40** 4 (2017) 41.
<https://doi.org/10.1140/epje/i2017-11528-2>
- [13] P. Suhonen, and R. Linna, *Chaperone-assisted translocation of flexible polymers in three dimensions*, *Physical Review E* **93** 1 (2016) 012406.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.93.012406>
6
- [14] W. Yu, K. Luo, Polymer translocation through a nanopore driven by binding particles: Influence of chain rigidity,

nanopores, *Journal of Chemical Physics* **142**
8 (2015) 084901.
<https://doi.org/10.1063/1.4913468>

[24] T. Menais, Polymer translocation under a pulling force: Scaling arguments and threshold forces, *Physical Review E* **97** 2 (2018) 022501.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.97.022501>

[25] S. Plimpton, Fast parallel algorithms for short-range molecular dynamics, *Journal of Computational Physics* **117** 1 (1995) 1-19.
<https://doi.org/10.1006/jcph.1995.1039>

[26] W. Humphrey, A. Dalke, K. Schulten, VMD: visual molecular dynamics, *Journal of molecular graphics* **14** 1 (1996) 33-38.
[https://doi.org/10.1016/0263-7855\(96\)00018-5](https://doi.org/10.1016/0263-7855(96)00018-5)

[27] T. Williams, C. Kelley, Gnuplot 4.4: *an interactive plotting program* (2010).

<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.117.247802>

[20] V. Lehtola, R. Linna, K. Kaski, Critical evaluation of the computational methods used in the forced polymer translocation, *Physical Review E* **78** (2008) 061803.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.78.061803>

[21] A. Bhattacharya, et al., Scaling exponents of forced polymer translocation through a nanopore, *European Physical Journal E* **29** 4 (2009) 423-429.
<https://doi.org/10.1140/epje/i2009-10495-5>

[22] K. Luo, T. Ala-Nissila, S. Yingand, R. Metzler, Driven polymer translocation through nanopores: Slow-vs.-fast dynamics, *Europhysics Letters* **88** (2009) 68006.
<https://doi.org/10.1209/0295-5075/88/68006>

[23] J. Wang, Y. Wang, K. Luo, Dynamics of polymer translocation through kinked