

Proteinlerin Moleküler Dinamik Simülasyonları

Doç. Dr. Mustafa TEKPINAR

2026-02-26

İçindekiler

1	Önsöz	1
2	Teorik Temeller	3
2.1	Bu Bölümde Neler Öğreneceğiz?	3
2.2	Moleküler Dinamik Simülasyonları Nedir?	3
2.3	Tarihsel Arka Plan	4
2.4	Temel Mantık	4
2.5	Güçlü ve Zayıf Yönler	7
2.6	Neden Önemli?	7
2.7	Sonuç	8
2.8	Bölüm Özeti	8
3	MD Simülasyonlarına Hazırlık	9
3.1	Bu Bölümde Neler Öğreneceğiz?	9
3.2	Protein Görselleştirme Programları	9
3.3	Gromacs programının kurulması	10
3.4	Sistemin inşa edilmesi	10
3.4.1	Proteinin hazırlanması	10
3.4.2	Sisteme solvent eklenmesi	11
3.4.3	Sisteme doğal ortam iyonlarının eklenmesi	12
3.5	Bölüm Özeti	13
4	MD Simülasyonlarını Çalıştırma	15
4.1	Bu Bölümde Neler Öğreneceğiz?	15
4.2	Enerji minimizasyonu	15
4.3	Dengeleme simülasyonları	15

İçindekiler

4.4	Üretim simülasyonları	16
4.5	Yüksek başarılı hesaplama sistemleri	17
4.6	Bölüm Özeti	17
5	MD Simülasyon Analizleri	19
5.1	Bu Bölümde Neler Öğreneceğiz?	19
5.2	Yapisal Analizler	19
5.2.1	RMSD (Root Mean Square Deviation)	19
5.2.2	RMSF (Root Mean Squared Fluctuations):	21
5.2.3	Radius of Gyration (R_g) Analizi	23
5.2.4	SASA (Solvent Accessible Surface Area):	24
5.2.5	İkincil Yapı	26
5.2.6	İkincil Yapıların Tanımlanması	26
5.2.7	Zaman İçinde İkincil Yapı Değişimi	27
5.2.8	Nicel Analiz Yöntemleri	27
5.2.9	Ana Bileşen Analizi (Principal Component Analysis, PCA)	28
5.3	Enerji Analizleri	31
5.4	Bölüm Özeti	31
6	Ek 1: Amino Asitler ve Proteinler	33
6.1	Giriş	33
6.2	Amino Asitler	33
6.3	Proteinlerin Yapı Düzeyleri	34
6.4	Protein Yapısı Belirleme Yöntemleri	36
6.4.1	Deneysel Yöntemler	37
6.4.2	Teorik Yöntemler	38
6.5	Protein Veri Tabanları	39
6.6	Özet	39
7	Ek 2: Protein Moleküler Dinamik Simülasyonlarında Kuvvet Alanları	41
7.1	Giriş	41

İçindekiler

7.2	Kuvvet Alanlarının Genel Yapısı	41
7.2.1	Bağ (Bond) terimi	42
7.2.2	Açı (Angle) terimi	42
7.2.3	Dihedral (Torsiyon) terimi	42
7.2.4	Bağısız (Non-bonded) etkileşimler	43
7.3	Protein Simülasyonlarında Kullanılan Başlıca Kuvvet Alanları	43
7.3.1	AMBER	43
7.3.2	CHARMM	44
7.3.3	OPLS	44
7.3.4	GROMOS	44
7.3.5	Yeni Nesil Kuvvet Alanları	44
7.4	Kuvvet Alanı Seçiminde Dikkat Edilecek Noktalar	44
7.5	Sık Yapılan Hatalar ve Öneriler	45
7.6	Özet	45
8	Ek 3: Bash Komut Satırı	47
8.1	Giriş	47
8.2	Dosya ve Dizin İşlemleri	47
8.3	Dosya Görüntüleme	48
8.4	Kopyalama ve Taşıma	48
8.5	Arama ve Filtreleme	48
8.6	Süreç ve Kaynak Yönetimi	49
8.7	Dosya Aktarımı	49
8.8	Program Kurma	49
8.9	Sonuç	51
9	Kaynaklar	53
9.1	Ders Kitapları	53
9.2	Derleme Makaleler	53

1 Önsöz

Moleküler dinamik simülasyonları fizik, kimya, moleküler biyoloji, eczacılık, tıp ve biyomühendislik gibi çeşitli alanlarda kullanılan bilişimsel bir araştırma teknigidir. Bu tekniğin geniş bir uygulama alanı olmasında rağmen bu alandaki Türkçe kaynak sayısı oldukça azdır. Bu nedenle, bu kitapta proteinlerin moleküler dinamik (MD) simülasyonlarını pratik bir yaklaşımla ele alacağız. Kitapta ağırlıklı olarak MD simülasyonlarının açık kaynak kodlu Gromacs paketi ile yapılması hedeflenmektedir. Kitap, kısa bir teorik temeller bölümü ile başlayacaktır. Teorik temeller bölümünden sonra MD simülasyonlarına hazırlık aşamaları anlatılacaktır. Son bölümde ise MD simülasyonu analiz teknikleri sunulacaktır. Kitabın teorik bilgilerle dolu bir kitap olmasından ziyade pratik bir uygulama kitabı olması hedeflenmektedir. Kitabın, bu alanda araştırma yapmak isteyen ancak yabancı dildeki kaynaklardan henüz tam yararlanamayan ileri lisans öğrencileri ve lisansüstü öğrenciler için faydalı olacağını ümit ediyorum.

Kitabı PDF olarak indir: Proteinlerin Moleküler Dinamik Simülasyonları (PDF)

Başlamak için Teorik Temeller bölümüne göz atın.

2 Teorik Temeller

2.1 Bu Bölümde Neler Öğreneceğiz?

Bu bölümde moleküler dinamik simülasyonlarının temel kavramlarını ele alacağız.

2.2 Moleküler Dinamik Simülasyonları Nedir?

Moleküler dinamik (MD) simülasyonları, atomik ölçekteki sistemlerin zaman içindeki hareketlerini bilgisayar aracılığıyla incelemeye olanak sağlayan güclü bir yöntemdir. Temel fikir, doğada var olan parçacıkları sayısal olarak temsil etmek ve onların birbirleriyle etkileşimlerini bilgisayar üzerinde adım adım takip etmektir. Böylece laboratuvara gözlenmesi zor veya imkânsız olan süreçler sanal ortamda canlandırılabilir.

MD simülasyonlarını cazip kıلان noktalardan biri, karmaşık sistemlerin dinamiklerini doğrudan *izleyebilmemizdir*. Deneysel yöntemler genellikle bu süreçleri anlık görüntüler hâlinde sunarken, MD simülasyonları bize tüm zaman çizgisini ayrıntılı olarak verir.

2.3 Tarihsel Arka Plan

Moleküler dinamik yöntemleri ilk olarak 1950'lerin sonunda, bilgisayarların henüz oldukça sınırlı kapasitelere sahip olduğu dönemde geliştirilmiştir. Başlangıçta birkaç düzine atomdan oluşan sistemler üzerinde uygulanan bu teknik, bilgisayar gücündeki olağanüstü gelişmeler sayesinde günümüzde milyonlarca atom içeren biyolojik komplekslere kadar genişletilebilmiştir.

Bu ilerleme yalnızca hesaplama gücündeki artışla değil, aynı zamanda kuvvet alanlarının, algoritmaların ve yazılımların gelişmesiyle de mümkün olmuştur. Bugün MD, ilaç tasarımindan nanoteknolojiye kadar pek çok alanda vazgeçilmez bir araçtır.

2.4 Temel Mantık

Bir MD simülasyonu, kabaca üç aşamadan oluşur:

1. Başlangıç Modelinin Hazırlanması

Çalışılmak istenen sistemin atomik koordinatları tanımlanır. Bu bir proteinin yapısı, bir polimer zinciri ya da basit bir sıvı karışımı olabilir.

2. Sistemin Enerjisinin Belirlenmesi

Atomlar arası etkileşimleri tanımlayan “kuvvet alanı” seçilir. Kuvvet alanı atomlar arası etkileşmelerin hesaplanabilmesi için ihtiyaç duyacağımız parametreler setidir. Bu parametre seti kullanılarak, öncelikle sistemin toplam enerjisi hesaplanır.

3. Etki Eden Kuvvetlerin Belirlenmesi

Korunumlu kuvvetlerin olduğu bir sistemde enerji bilinirse her atom üzerine etki eden kuvvetler hesaplanabilir.

2.3 Tarihsel Arka Plan

4. Etki Eden İvmelerin Belirlenmesi

Eğer bir atoma etkiyen net kuvvet bilinirse $F=ma$ denklemi ile ona etkiye ivme hesaplanabilir.

5. Zamanın Çok Küçük Adımlarlar İlerletilmesi

İvme bilinirse hızı hesaplamak sadece temel fizik denklemlerinin uygulanmasıdır. Hız kullanılarak küçük bir zaman dilimi sonrasında (dt: genellikle bir kaç femtosaniye) konumlar hesaplanabilir. Konumlar güncellendiği için sistemin enerjisi artık değişmiştir. Bu durumda tekrar 2. adıma gidip bu döngüyü tekrarlamak gereklidir. Gündelik hayatı SI birim sistemine göre en küçük zaman birimi saniyedir. Ancak MD simülasyonlarında femtosaniye zaman birimi yaygın olarak kullanılır. Femtosaniye, pikosaniye, nanosaniye, mikrosaniye, milisaniye ve saniye zaman birimleri arasındaki ilişki aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

Aşağıdaki tablo, saniyenin alt katmanlarındaki birimlerin birbirine ve saniyeye göre büyüklüklerini göstermektedir.

Birim Adı	Sembol	1 Birimin Saniye Cinsinden Değeri	1 Saniyede Kaç Tane	Açıklama
Femtosaniye	fs	10^{-12} s	1 000 000 000 000 000	1 saniyenin katrilyonda biri
Pikosaniye	ps	10^{-12} s	1 000 000 000 000	1 saniyenin trilyonda biri
Nanosaniye	ns	10^{-9} s	1 000 000 000	1 saniyenin milyarda biri

2 Teorik Temeller

Birim Adı	Sembol	1 Birimin Saniye Cinsinden Değeri	1 Saniyede Kaç Tane	Açıklama
Mikrosaniye	μs	10^{-6} s	1 000 000	1 saniyenin milyonda biri
Milisaniye	ms	10^{-3} s	1 000	1 saniyenin binde biri
Saniye	s	1 s	1	SI temel zaman birimi

Dönüştüm Örnekleri

- $1 \text{ ns} = 1000 \text{ ps}$
 - $1 \mu\text{s} = 1000 \text{ ns}$
 - $1 \text{ ms} = 1000 \mu\text{s}$
 - $1 \text{ s} = 1000 \text{ ms}$
-

$\text{ps}[\text{"Pikosaniye } (10^{12})"] \text{ ps} \rightarrow \text{ns}[\text{"Nanosaniye } (10^9)"] \text{ ns} \rightarrow$
 $\mu\text{s}[\text{"Mikrosaniye } (10^6)"] \mu\text{s} \rightarrow \text{ms}[\text{"Milisaniye } (10^3)"] \text{ ms} \rightarrow$
 $\text{s}[\text{"Saniye } (1)"]$

— —>

2.5 Güçlü ve Zayıf Yönler

Bu adımların yinelenmesiyle sistemin dinamikleri elde edilir. Ortaya çıkan veriler, sonrasında analiz edilerek anlamlı bilimsel sonuçlara dönüştürülür.

2.5 Güçlü ve Zayıf Yönler

Güçlü Yanlar:

- Atomik çözünürlükte ayrıntı sağlar.
- Deneylerde gözlenemeyen süreçler gözlenebilir.
- Koşullar kolayca değiştirilebilir (sıcaklık, basınc, iyon derişimi).

Zayıf Yanlar:

- Erişilebilen zaman ölçüği sınırlıdır (mikro–milisaniyeler).
 - Kuvvet alanları belirli yaklaşılara dayanır, kuantum mekaniksel fizigi tam olarak yansıtmayabilir.
-

2.6 Neden Önemli?

Moleküler dinamik simülasyonlarının önemi, deneysel verilerle **tamamlayıcı** bir ilişki kurabilmesinde yatkınlıkta.

- Deneyler bize makroskopik gözlemler sunarken, MD simülasyonları bu gözlemlerin ardından atomik ayrıntıları ortaya çıkarır.

2 Teorik Temeller

- Protein kristal yapıları bize “donmuş” bir görüntü verir; MD ise bu yapının esnekliğini ve hareketliliğini gösterir.
 - Malzeme testleri bir polimerin dayanıklılığını ölçebilir; MD ise polimer zincirlerinin kirılma mekanizmasını açıklayabilir.
-

2.7 Sonuç

Moleküler dinamik simülasyonları, modern bilimin en güçlü mikroskoplarından biri gibidir: Atomların dünyasına benzersiz bir pencere açar. Elbette her mikroskop gibi sınırlamaları vardır; ancak doğru kullanıldığında hem biyolojide hem de malzeme biliminde olağanüstü katkılar sağlar.

2.8 Bölüm Özeti

3 MD Simülasyonlarına Hazırlık

3.1 Bu Bölümde Neler Öğreneceğiz?

Bu bölümde öncelikle protein görselleştirme programlarını tanıtacağız. Ardından, moleküler dinamik simülasyonlarının temel aşamalarını ele alacağız. Kabaca bir moleküler dinamik simülasyonunun hazırlık aşamaları aşağıdaki basamakları içerir:

1. Sistemin inşa edilmesi
2. Sistemin enerjisinin minimize edilmesi
3. Sistemin dengelenmesi (equilibration)
4. Üretim aşaması

Bu basamakları teker teker ele alalım. Ancak herşeyden önce en temel yazılımlarla, yani protein görselleştirme yazılımları ile başlayalım.

3.2 Protein Görselleştirme Programları

Protein yapılarının kullanıldığı bütün araştırmalarda en temel ihtiyaçlardan bir tanesi protein yapısının görselleştirilmesidir. Bu nedenle yaygın olarak kullanılan çeşitli programlar geliştirilmiştir. Moleküler dinamik simülasyonları için de bu yazılımlar olmazsa olmazdır. Bu kitabın yazarı Pymol ve ChimeraXprotein görselleştirme yazılımlarını kullanmakta ve okuyucularına tavsiye etmektedir. Bu iki yazılımin dışında, özellikle moleküler dinamik simülasyon yörüngे dosyalarının görüntülenmesi için VMD yazılımı da kurulmalıdır.

3.3 Gromacs programının kurulması

Gromacs açık kaynak kodlu bir yazılımdır ve şu adresten indirilebilir:
<https://manual.gromacs.org/current/download.html>

Eğer Ubuntu Linux kullanıyorsanız aşağıdaki komut Gromacs’ı sizin için kuracaktır:

```
sudo apt install gromacs
```

3.4 Sistemin inşa edilmesi

Sistemin doğru bir biçimde inşa edilmesi için adım adım ilerlemek gereklidir:
1. Proteinin hazırlanması 3. Sisteme solvent eklenmesi 4. Sisteme doğal ortam iyonlarının eklenmesi

3.4.1 Proteinin hazırlanması

Hedef protein yapısının bulunması, temizlenmesi ve eksik (ise) hidrojenlerin eklenmesi ve doğru protonasyon durumlarının belirlenmesi için aşağıdaki adımlar uygulanır:

```
initial_pdb=AF-P22303-F1-model_v4
file_prefix=aces_human_monomer_wt
force_field=amber99sb-ildn

#Note that if spc, spce, or tip3p model is used, solvent_model=spc216
solvent_model=tip3p

#Call pdb2pqr to determine protonation states of the residues at pH 7.4
pdb2pqr30 --ff PARSE --ffout AMBER --titration-state-method\
```

3.4 Sistemin inşa edilmesi

```
propka --with-ph 7.4 ${initial_pdb}.pdb \
${initial_pdb}-pwb2pqr30.pqr \
--pdb-output ${initial_pdb}-pwb2pqr30.pdb

#Add hydrogens if absent, select water model and force field
gmx pdb2gmx -f ${initial_pdb}-pwb2pqr30.pdb \
-o ${file_prefix}_processed.pdb \
-water tip3p -ff ${force_field}
```

gmx pdb2gmx ile başlayan sonraki komuttaki **-water** parametresinden sonra ise su modelini tip3p olarak seçiyoruz. Bu su modeli en yaygın kullanılan su modellerinden biridir.

3.4.2 Sisteme solvent eklenmesi

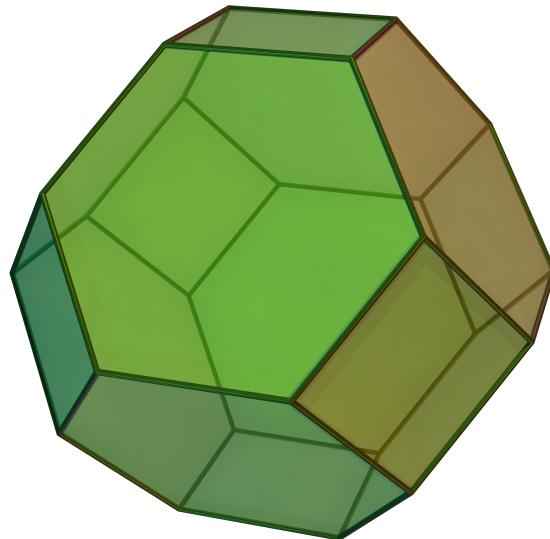
Proteinler genellikle su ortamında işlevlerini yerine getirir. Bu nedenle bir simülasyon yaparken sisteme mutlaka su eklenmesi gereklidir. Aşağıdaki bash komutları ile sisteme su ekleyebiliriz.

```
#Define box properties
gmx editconf -f ${file_prefix}_processed.pdb \
-o ${file_prefix}_newbox.pdb \
-bt octahedron -c -d 1.1 -princ

#Produce box
if [ "$solvent_model" == "tip3p" ] || \
[ "$solvent_model" == "spc" ] || \
[ "$solvent_model" == "spce" ];
then
    gmx solvate -cp ${file_prefix}_newbox.pdb -cs spc216.gro \
        -o ${file_prefix}_solv.pdb -p topol.top
fi
```

3 MD Simülasyonlarına Hazırlık

Yukarıdaki komutları kısaca açıklayalım: Gromacs programında adet olduğu üzere, **-f** parametresinden sonra input dosyası eklenir, **-o** parametresinden sonrasında ise çıktı dosyasının adı yazılır. **-bt** parametresi “box type (kutu tipi)” seçmek için kullanılır. Burada kutu tipi olarak **octahedron** seçilmiştir. Octahedron kutu tipinin yapısı Şekil 3.1’de gösterilmektedir. **-c** parametresi proteini seçilen kutunun merkezine alması gerektiğini ifade eder. **-d 1.1** parametresi ise proteinden kutunun kenarlarına en az 1.1 nm (11 Angstrom) mesafe olması gerektiğini belirtir.



Şekil 3.1: Octahedron kutu. (Kaynak: Bu resim Wikipedia’dan alınmıştır.)

3.4.3 Sisteme doğal ortam iyonlarının eklenmesi

Aşağıdaki komut sisteme Na ve Cl iyonlarını ekleyip sistemin toplam yükünü sıfır yapacaktır. Sisteme iyonlar eklenirken 0.15 Molar konsantrasyon da sağlanmaya çalışılacaktır.

3.5 Bölüm Özeti

```
#Prepare for ion addition
gmx grompp -f ions2mdp -c ${file_prefix}_solv.pdb -maxwarn 2 \
-p topol.top -o ions.tpr

#Produce and place ions
gmx genion -s ions.tpr -o ${file_prefix}_solv_ions.pdb \
-p topol.top -pname NA -nname CL -neutral -conc 0.15

#Good news: Preparation is over!
#Bad news : Trouble has just started!
```

3.5 Bölüm Özeti

4 MD Simülasyonlarını Çalıştırma

4.1 Bu Bölümde Neler Öğreneceğiz?

Bu bölümde moleküler dinamik simülasyonları çalıştırmanın temel aşamalarını ele alacağız. Tüm çalışma aşamalarından önce grompp (gromacs preprocessor) programını çalıştırıp tpr uzantılı bir dosya elde etmek gereklidir.

4.2 Enerji minimizasyonu

Hazırladığımız sistemde birbirine aşırı yakın parçacıklar olabilir. Bunların birbirinden uzaklaştırılması ve parçaçıklarının belirli bir denge konumuna getirilmesi gereklidir. Bunun için sistemin toplam enerjisinin minimize edilmesi gereklidir. Bu aşamada parçaçıklara herhangi bir hız atanmadığı akılda tutulmalıdır.

```
gmx grompp -f minim.mdp -c protein.pdb -p topologyFile.top -o em.tpr  
gmx mdrun -v -deffnm em
```

4.3 Dengeleme simülasyonları

Dengeleme simülasyonları Gromacs içerisinde iki aşamada yapılır: 1. NVT dengeleme: Bu aşamada sistemin parçacık sayısı (N), hacmi (V) ve sıcaklığı

4 MD Simülasyonlarını Çalıştırma

(T) sabit tutulur. Burada, önceki aşamanın sonunda üretilen em.gro dosyasını input olarak kullanacağız. Minimizasyon dosyasına ek olarak NVT dengelemesi sırasında Gromacs tarafından kullanılacak olan nvtmdp input dosyasına da ihtiyacımız olacaktır.

```
gmx grompp -f nvtmdp -c em.gro -p topologyFile.top -r em.gro -o nvt.tpr  
gmx mdrun -v -deffnm nvt
```

2. NPT dengeleme: Bu aşamada sistemin parçacık sayısı (N), basıncı (P) ve sıcaklığı (T) sabit tutulur.

```
gmx grompp -f nptmdp -c nvt.gro -r nvt.gro -t nvt.cpt -p topologyFile.top -o npt.tpr  
gmx mdrun -v -deffnm npt
```

4.4 Üretim simülasyonları

MD simülasyonunun son aşaması olan üretim simülasyonları, genellikle analizini yapacağımız yörüngे ve enerji dosyalarının üretildiği aşamadır. Aslında NPT simülasyonları ile çok benzer parametrelere sahiptir ancak NPT simülasyonlarına göre çok daha uzundur. Aşağıdaki komut üretim simülasyonlarını başlatacaktır.

```
gmx grompp -f runmdp -c npt.gro -t npt.cpt -p topologyFile.top -o prod-sim1  
gmx mdrun -v -deffnm prod-sim1
```

Eğer üretim aşaması simülasyonunuz herhangi bir sebeple yarıda kesilirse, aşağıdaki komut ile kaldığı yerden devam edebilirsiniz.

4.5 Yüksek başarımlı hesaplama sistemleri

```
gmx mdrun -v -s prod-sim1.tpr -cpi prod-sim1.cpt -deffnm prod-sim1
```

MD simülasyonunuz bittikten sonra simülasyon süresinin uzatılması gerektiğini farkedebiliriz. Bu durumda Gromacs içindeki *extend* parametresinden yararlanabiliriz. Aşağıdaki komut simülasyonu 75 nanosaniye (75000 pikosaniye) uzatmak için yeni bir tpr dosyası oluşturacaktır. Bu yeni tpr kullanılarak simülasyon, kaldığı yerden devam ettirilebilir.

```
gmx convert-tpr -s prod-sim1.tpr -extend 75000 -o prod-sim1-extended.tpr  
gmx mdrun -v -s prod-sim1-extended.tpr -cpi prod-sim1.cpt -deffnm prod-sim1
```

Tüm bilimsel çalışmalarında olduğu gibi MD simülasyonlarını da bir kaç kere tekrarlamak gereklidir. Bu, bilimsel çalışmanın tekrarlanabilirliğini ispat etmek için olmazsa olmaz bir şeydir.

4.5 Yüksek başarımlı hesaplama sistemleri

MD simülasyonları çok sayıda işlemciye veya ekran kartına ihtiyaç duyulan uzun hesaplamalıdır. Bu nedenle bir masaüstü bilgisayar yerine yüksek başarımlı hesaplama sistemlerinin kullanılması daha uygundur. Ülkemizde bu açıdan en iyi kaynaklardan biri Ulakbim tarafından sağlanan TRUBA-TRGrid hizmetidir. Bu hizmetten yararlanmak için şu web sitesini ziyaret edebilirsiniz: <https://portal.truba.gov.tr/>

4.6 Bölüm Özeti

5 MD Simülasyon Analizleri

5.1 Bu Bölümde Neler Öğreneceğiz?

Bu bölümde MD simülasyonlarının analizleri için kullanılan bazı standart teknikler anlatılacaktır. Bu analiz teknikleri yapısal ve enerji analizleri olarak ikiye ayrılabilir. Ele alacağımız yapısal analiz teknikleri şunlardır: RMSD, RMSF, Rg,SASA, ikincil yapı, PCA.

5.2 Yapısal Analizler

Moleküller dinamik (MD) simülasyonları, atomik düzeyde bir sistemin zaman içindeki davranışını incelememizi sağlar.

Bu tür simülasyonlarda elde edilen sonuçların anlamlı şekilde yorumlanabilmesi için çeşitli **yapısal analiz yöntemleri** kullanılır. Yapısal analizleri gerçekleştirebilmeniz için elimizde bir topoloji dosyası (genellikle gro, pdb veya tpr formatında) ve bir yörüngе dosyası (xtc veya trr formatında) bulunması gereklidir.

5.2.1 RMSD (Root Mean Square Deviation)

RMSD (Root Mean Square Deviation), bir molekülün belirli bir referans yapısına göre ortalama konum değişimini nicel olarak ölçen bir metriktir.

5 MD Simülasyon Analizleri

Basitçe ifade etmek gerekirse, RMSD zaman içinde yapının **ne kadar değiştiğini** gösterir.

Matematiksel olarak RMSD şöyle tanımlanır:

$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\mathbf{r}_i(t) - \mathbf{r}_i^{ref})^2}$$

Burada:

- N : Karşılaştırılan atom sayısıdır.
- $\mathbf{r}_i(t)$: Zaman t 'deki i . atomun koordinatıdır.
- \mathbf{r}_i^{ref} : Referans yapıdaki i . atomun koordinatıdır.

5.2.1.1 RMSD'nin Anlamı

RMSD değeri bize sistemin **yapısal kararlılığı** hakkında bilgi verir:

RMSD Değeri	Yorum
0 – 1 Å	Yapı referansa çok benzer; yüksek kararlılık
1 – 3 Å	Küçük yapısal değişiklikler; olası uyum veya gevşeme
> 3 Å	Belirgin yapısal değişim veya konformasyonel geçiş

RMSD'nin tek başına bir ölçüt olmadığı unutulmamalıdır. Yüksek RMSD değeri her zaman sistemin dengesiz olduğu anlamına gelmez; yapının farklı ama kararlı bir konformasyona geçmesi de mümkündür.

5.2 Yapısal Analizler

5.2.1.2 Referans Yapı Seçimi

RMSD analizinde kullanılacak **referans yapı** son derece önemlidir. Genellikle aşağıdaki seçeneklerden biri tercih edilir:

1. **Başlangıç yapısı** (örneğin enerji minimizasyon sonrası yapı)
2. **Zaman ortalaması alınmış yapı**
3. **Kristal yapı veya deneysel referans**

Her durumda, RMSD hesaplanmadan önce **hizalama (alignment)** yapılmalıdır.

Bu hizalama genellikle **C (alfa karbon)** veya **backbone** atomları üzerinden gerçekleştirilir.

Gromacs ile RMSD hesaplamak için aşağıdaki komutu Terminal'de yazmak yeterli olacaktır:

```
echo 3 3 | gmx rms -s pdb_filename -f traj_filename -o  
rmsd.xvg -tu ns
```

5.2.2 RMSF (Root Mean Squared Fluctuations):

RMSF (Root Mean Square Fluctuation), moleküler dinamik (MD) simülasyonlarında her bir atomun veya rezidünün zaman içindeki ortalama konum dalgalanmasını ölçen bir metriktir. Bu analiz, yapının hangi bölgelerinin **esnek**, hangi bölgelerinin **daha rijit** olduğunu anlamak için kullanılır.

5 MD Simülasyon Analizleri

5.2.2.1 RMSF Tanımı

Her bir atom veya rezidü için RMSF değeri şu şekilde hesaplanır:

$$\text{RMSF}_i = \sqrt{\langle (\mathbf{r}_i(t) - \langle \mathbf{r}_i \rangle)^2 \rangle_t}$$

Burada:

- $\mathbf{r}_i(t)$: Zaman t 'deki i . atomun koordinatıdır.
 - $\langle \mathbf{r}_i \rangle$: Tüm simülasyon süresince i . atomun ortalama konumudur.
 - $\langle \dots \rangle_t$: Zaman ortalamasını ifade eder.
-

5.2.2.2 RMSF'nin Yorumu

- **Düşük RMSF değerleri (0–1 Å)**: Bölge katıdır, genellikle protein çekirdeği veya ikincil yapı elementleri (örneğin -heliks, -tabaka).
 - **Yüksek RMSF değerleri (2–5 Å ve üzeri)**: Bölge esnektir, genellikle loop, uç kısımlar veya bağlanma bölgeleri.
-

Gromacs ile RMSF hesaplamak için aşağıdaki komutu Terminal'de yazmak yeterli olacaktır:

```
echo 3 3 | gmx rmsf -s pdb_filename -f traj_filename -res -oq rmsf.pdb
```

5.2.3 Radius of Gyration (R_g) Analizi

Radius of Gyration (R_g), bir molekülün kütle merkezine göre atomlarının ne kadar dağılmış olduğunu ölçen bir metriktir. Proteinlerde R_g genellikle **kompaktlık, katlanma durumu** ve **kararlılık** hakkında bilgi verir. Radius of gyration şu şekilde tanımlanır:

$$R_g = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N m_i |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{km}|^2}{\sum_{i=1}^N m_i}}$$

Burada:

- m_i : $i.$ atomun kütlesi,
- \mathbf{r}_i : $i.$ atomun koordinatı,
- \mathbf{r}_{km} : sistemin kütle merkezidir,
- N : toplam atom sayısıdır.

Rg Değeri	Yorum
Düşük Rg (örneğin 15 Å)	Protein kompakt, katlanmış durumda
Yüksek Rg (örneğin 25 Å)	Protein genişlemiş veya kısmen açılmış durumda

Zaman içinde R_g 'nin sabit kalması sistemin **katlanma kararlılığını**, düzenli artması ise **açılmayı (unfolding)** gösterebilir.

5 MD Simülasyon Analizleri

Gromacs ile Rg hesaplamak için aşağıdaki komutu Terminal'de yazmak yeterli olacaktır:

```
echo 3 3 | gmx gyrate -s pdb_filename -f traj_filename -o gyrate.xvg
```

5.2.4 SASA (Solvent Accessible Surface Area):

SASA (Solvent Accessible Surface Area), bir molekülün çözücü (genellikle su) tarafından erişilebilir yüzey alanını ifade eder. Bu kavram, proteinlerin **hidrofobik** ve **hidrofilik yüzey özelliklerini**, **katlanma davranışlarını** ve **ligand bağlanma bölgelerinin** analizini anlamada önemli bir ölçütür.

Bir molekülün SASA'sı, hayatı bir **çözücüküküresi** (örneğin su molekülü için yarıçapı yaklaşık 1.4 Å) kullanılarak hesaplanır. Bu küre, molekülün atomları etrafında “yuvarlanır” ve çözücüünün temas edebileceği yüzey alanı ölçülür.

SASA değeri, genellikle şu iki katının toplamıdır:

$$SASA_{\text{total}} = SASA_{\text{polar}} + SASA_{\text{apolar}}$$

- $SASA_{\text{polar}}$: Hidrofilik (kutupsal) atomların oluşturduğu yüzey alanı,
- $SASA_{\text{apolar}}$: Hidrofobik (apolar) atomların oluşturduğu yüzey alanı.

5.2 Yapısal Analizler

5.2.4.1 SASA Hesaplama Yöntemi

SASA tipik olarak **Lee–Richards algoritması** (1971) veya **Shrake–Rupley yöntemi** (1973) kullanılarak hesaplanır.

Bu yöntemlerde atomlar **Van der Waals yarıçapına** sahip küreler olarak temsil edilir.

Bir çözücükü küresi bu yüzeyde gezdirilerek toplam erişilebilir alan sayısal olarak bulunur.

Basitleştirilmiş fikir:

Su molekülü, proteinin etrafında “kayarken” hangi atomlara temas edebiliyorsa, o atomlar SASA’ya katkı yapar.

5.2.4.2 SASA ve Yapısal Özellikler

SASA değeri proteinlerin **katlanma durumu** ve **kararlılığı** hakkında güçlü ipuçları verir:

Gözlenen Durum	SASA Davranışı	Yorum
Katlanmış protein	SASA düşük	Hidrofobik bölgeler içindedir, çözücüden korunmuştur
Açılmış protein	SASA yüksek	Hidrofobik bölgeler açığa çıkmıştır

5 MD Simülasyon Analizleri

Gözlenen Durum	SASA Davranışı	Yorum
Ligand bağlanması	SASA azalır	Bağlanma bölgesinde çözücü erisimi kısıtlanır

Gromacs ile SASA hesaplamak için aşağıdaki komutu Terminal'de yazmak yeterli olacaktır: `echo 1 | gmx sasa -s pdb_filename -f traj_filename -o sasa.xvg -tu ns`

5.2.5 İkincil Yapı

Proteinlerin **ikincil yapıları** (örneğin α -heliks ve β -tabaka bölgeleri), üç boyutlu katlanmalarının temelini oluşturur. Moleküler dinamik (MD) simülasyonları, bu yapıların zaman içindeki **kararlılığını** ve **dönüşüm süreçlerini** incelemek için güçlü bir araçtır. İkincil yapı analizleri, simülasyon süresince protein zincirinin **hangi bölgelerinde heliks, tabaka veya düzensiz yapı** (coil, turn vb.) bulunduğu izlemeye dayanır.

5.2.6 İkincil Yapıların Tanımlanması

MD simülasyonlarında ikincil yapı elemanları genellikle **DSSP (Define Secondary Structure of Proteins)** algoritmasıyla belirlenir. DSSP, hidrojen bağlarını ve geometriyi temel alarak her bir amino asidi sınıflandırır:

5.2 Yapısal Analizler

Sembol	Yapı Türü	Açıklama
H	α -Heliks	Düzenli helikal yapı
G	β -Heliks	Sıkı helikal yapı
E	β -Tabaka	Uzamiş yapı
T	Turn	Zincir yön değişimi
C	Coil	Düzensiz bölge

5.2.7 Zaman İçinde İkincil Yapı Değişimi

Simülasyon boyunca ikincil yapı değişimleri genellikle bir **zaman–residue ısı haritası** (heatmap) şeklinde gösterilir.

Bu tür analizler, **kararlı bölgelerin** (örneğin sürekli helikal kalan segmentler) ve **esnek bölgelerin** (heliks–coil dönüşümü yapan kısımlar) ayırt edilmesini sağlar.

Yorum:

Eğer bir α -heliks bölgesi zamanla coil yapıya dönüşüyorrsa, bu durum genellikle lokal kararlılığın azalması veya çevresel etkilerin (örneğin sıcaklık, ligand bağlanması) artmasıyla ilişkilidir.

5.2.8 Nicel Analiz Yöntemleri

Bazı metrikler ikincil yapı değişimini sayısal olarak özetler:

- **Heliks oranı (f_H):** Zaman ortalaması olarak heliks karakterine sahip rezidülerin yüzdesi.
- **Tabaka oranı (f_E):** β -yapı içeren rezidülerin oranı.

5 MD Simülasyon Analizleri

- **DSSP zaman profili:** Her bir rezidülerin için zaman içinde yapısal durumun izlenmesi.

Gromacs ile ikincil yapı değişimlerini hesaplamak için aşağıdaki komutu Terminal'de yazmak yeterli olacaktır:

```
gmx do_dssp -s pdb_filename -f traj_filename -o dssp.xpm -sc  
residue_count.xvg
```

do_dssp programı arka planda dssp yazılımını kullanır (Burada atif yaz.). Eğer Ubuntu işletim sistemini kullanıyorsanız bu programı aşağıdaki komut ile önceden kurmak gereklidir:

```
sudo apt install dssp
```

5.2.9 Ana Bileşen Analizi (Principal Component Analysis, PCA)

D simülasyonlarında sistem çok boyutlu bir uzayda hareket eder. Her atomun üç uzaysal koordinatı düşünüldüğünde, bir proteinin hareketi binlerce boyutlu olabilir. Ana bileşen analizi (Principal Component Analysis, PCA), moleküler dinamik simülasyonlarında büyük ölçekli ve kolektif hareketleri ortaya çıkarmak için kullanılan güdü bir yöntemdir. Özellikle proteinlerin konformasyonel değişimlerini, fonksiyonel hareketlerini ve enerji yüzeyindeki baskın hareketleri anlamada yaygın olarak kullanılır. PCA, atomların zaman içindeki konum değişimlerinden korelasyon matrisi çıkararak, sistemdeki en baskın hareket modlarını tanımlar.

PCA'nın amacı:

- Bu yüksek boyutlu hareketi daha az sayıda “ana bileşene” indirmek
- En fazla varyansı açıklayan hareket yönlerini bulmak
- Kompleks hareketleri daha anlaşılır hale getirmek

5.2 Yapısal Analizler

Bu analizde ilk birkaç ana bileşen (PC1, PC2, bazen PC3), sistemdeki toplam varyansın büyük bir kısmını temsil eder. Bu nedenle biyolojik olarak anlamlı hareketler genellikle bu eksenler üzerinde incelenir.

5.2.9.1 GROMACS ile PCA Süreci

GROMACS yazılımı PCA için kapsamlı araçlar sunar ve bu analiz genellikle simülasyon sonucunda elde edilen yörünge (örneğin traj.xtc) ve ortalama yapı dosyaları üzerinden yürütülür. GROMACS'ta PCA genellikle şu adımlar üzerinden gerçekleştirilir:

1. Yörünge Dosyalarının Hizalanması

İlk olarak yapıların dönme ve öteleme hareketlerinin etkisini ortadan kaldırmak için yörünge dosyası referans bir yapıya göre hizalanır:

```
gmx trjconv -s topol.tpr -f traj.xtc -o fit.xtc -fit rot+trans
```

2. Kovaryans Matrisinin Hesaplanması

Hareket analizi için kovaryans matrisi çıkarılır. Bu işlem genellikle alfa karbonları (C) veya belirli atom grupları üzerinden yapılır:

```
gmx covar -s topol.tpr -f fit.xtc -o eigenval.xvg -v eigenvec.trr
```

3. Projeksiyon Hesabı

Hesaplanan özvektörlere göre yörüngenin her karesindeki koordinatlar bu özvektörler üzerine projekte edilir:

```
gmx anaeeig -v eigenvec.trr -f fit.xtc -proj proj.xvg -extr extreme.pdb
```

Bu komutlar aracılığıyla:

5 MD Simülasyon Analizleri

- proj.xvg: Hareketin PC1 veya PC2 gibi belirli bileşenler üzerindeki izdüşümünü verir.
- extreme.pdb: Sistem için aşırı pozisyonları (maksimum ve minimum hareket) çıkarır.

5.2.9.2 PCA Sonuçlarının Yorumlanması

PCA çıktılarına bakarken tipik olarak:

- **Eigenvalue (özdeğer) eğrileri:** Hangi ana bileşenin ne kadar varyans açıkladığını gösterir.
- **Projections (projeksiyon grafikleri):** Konformasyonel durumların zaman boyunca veya PC1–PC2 düzleminde nasıl dağıldığını ortaya koyar.
- **Extreme conformations:** Sistemin en uç hareketlerini yapısal olarak analiz etmeye imkân sağlar.

Bu analiz sayesinde proteinlerin açılma/kapanma hareketleri, döngü (loop) esnekliği, domain hareketleri ve fonksiyonel geçişleri gibi kritik dinamikleri net bir şekilde gözlemlenebilir.

Sonuç olarak ana bileşen analizi, MD simülasyonlarının en değerli yapısal analizlerinden biridir. GROMACS'in sunduğu araçlarla PCA süreci hem hızlı hem de oldukça esnektir. PCA, özellikle karmaşık biyomoleküller sistemlerde baskın hareketlerin ortaya çıkmasına ve biyolojik anlamanın güçlendirilmesine katkı sağlar.

5.3 Enerji Analizleri

5.3 Enerji Analizleri

5.4 Bölüm Özeti

6 Ek 1: Amino Asitler ve Proteinler

6.1 Giriş

Proteinler, canlılığın iş yapan makromolekülleridir. Kataliz (enzimler), taşıma (hemoglobin), savunma (antikorlar), sinyal iletimi (reseptörler) ve yapı (keratin, kollajen) gibi pek çok görevi üstlenirler. Tüm bu çeşitliliğin ortak kökeni **amino asitlerdir**—yani proteinlerin temel yapıtaşları.

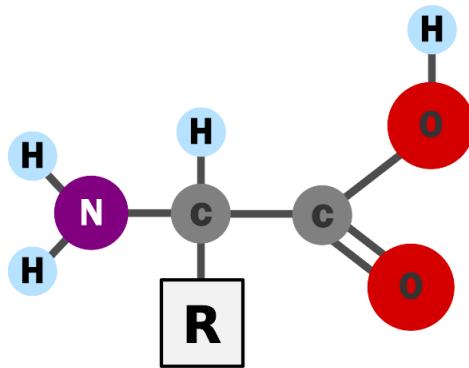
Bu bölümde önce amino asitlerin ortak mimarisini ve kimyasal çeşitliliğini özetleyecek, ardından proteinlerin **birincil**, **ikincil**, **tersiyer** ve **kuaterner** yapı düzeylerini anlaşılmış bir dille ele alacağız. Bölüm denklem içermez; kavramsal bir çerçeve sunar.

6.2 Amino Asitler

Her amino asit, aynı omurgayı paylaşır: bir **amino grubu** ($-\text{NH}_2$), bir **karboksil grubu** ($-\text{COOH}$), kiral bir **alfa karbonu** (C^α) ve değişken **yan zincir (R grubu)** (Şekil 6.1).

R grubu; polar/apolar olma, yük taşıma, aromatiklik veya kükürt içeriği gibi özellikleriyle amino asitlerin kimyasal davranışını belirler. Canlılarda doğal olarak bulunan 20 çeşit amino asit vardır ve bu amino asitler çeşitli özelliklerine göre grupperlendirilebilir (Şekil 6.2). Yan zincirlerin bu çeşitliliği,

6 Ek 1: Amino Asitler ve Proteinler



Şekil 6.1: Amino asidlerin genel yapısı. (Kaynak: Bu resim Wikipedia'dan alınmıştır.)

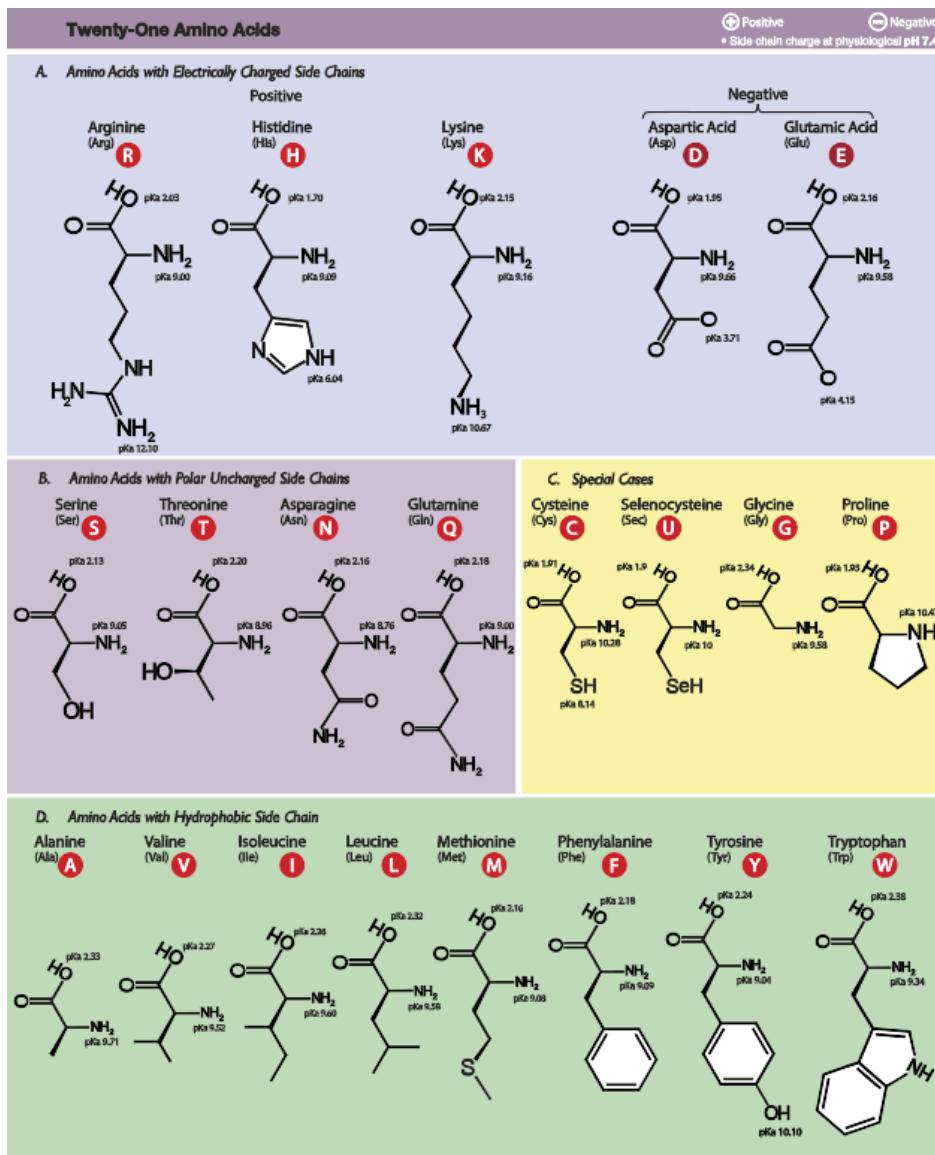
proteinlerin katlanma dinamiklerinden etkileşim ağlarına kadar her şeyi etkiler.

6.3 Proteinlerin Yapı Düzeyleri

Protein yapısını kavramak için dört düzeyi ayırt ederiz:

1. **Birincil yapı (primary)**: Amino asitlerin doğrusal dizilimi (sekans).
2. **İkincil yapı (secondary)**: Yerel düzenli motifler — **-heliks** ve **-tabaka** gibi.
3. **Tersiyer yapı (tertiary)**: Tek zincirin üç boyutlu, işlevsel katlanmış hali.
4. **Kuaterner yapı (quaternary)**: Birden fazla polimer zincirinin (alt birimlerin) bir araya gelerek oluşturduğu kompleks.

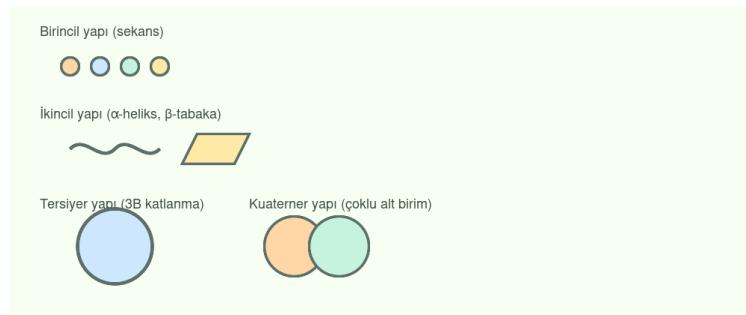
6.3 Proteinlerin Yapı Düzeyleri



Şekil 6.2: 20 doğal amino asit ve bunların gruplandırılması. (Kaynak: Bu resim Wikipedia'dan alınmıştır.)

6 Ek 1: Amino Asitler ve Proteinler

Bu düzeyler hiyerarşiktir: Sekans, ikincil motif eğilimlerini belirler; yan zincir etkileşimleri (hidrofobik paketleme, hidrojen bağları, tuz köprüleri, aromatik etkileşimler, disülfit bağları) tersiyer mimariyi şekillendirir; uygun arayüzler ise kuaterner etkileşimleri mümkün kılar.



Şekil 6.3: Yapı düzeylerinin şematik gösterimi

TODO: Şekil 6.3'yi düzeltmeyi unutma. !!!

6.4 Protein Yapısı Belirleme Yöntemleri

Proteinlerin üç boyutlu yapısını anlamak, biyolojik işlevlerini çözümlemek için temel bir gereklilikdir. Bir proteinin dizisi (birincil yapısı) genomdan doğrudan elde edilebilir, ancak bu dizinin nasıl katlanarak üç boyutlu bir yapıya dönüştüğünü bilmek için ek yöntemlere ihtiyaç vardır. Bu yöntemler iki ana başlık altında toplanabilir: **deneysel** yöntemler ve **teorik** yöntemler.

6.4 Protein Yapısı Belirleme Yöntemleri

6.4.1 Deneysel Yöntemler

6.4.1.1 X-ışını Kristalografisi

X-ışını kristalografisi, protein yapısını çözmek için uzun yillardır kullanılan “altın standart” yöntemdir. Protein kristallerinden elde edilen kırınım desenleri analiz edilerek atomların üç boyutlu yerleşimi ortaya çıkarılır.

- **Avantajı:** Yüksek çözünürlük (genellikle 2 Å veya daha iyi).
- **Dezavantajı:** Kristal büyütme zordur ve bazı proteinler kristallenmez.

6.4.1.2 Nükleer Manyetik Rezonans (NMR) Spektroskopisi

NMR, çözeltideki proteinlerin yapısını belirlemeye yarar. Atom çekirdekleri arasındaki manyetik etkileşimler ölçülür ve bunlardan uzaysal kısıtlamalar elde edilir.

- **Avantajı:** Kristalleşme gerektirmez, proteinin doğal ortamına daha yakındır.
- **Dezavantajı:** Genellikle 40 kDa altındaki proteinler için uygundur.

6.4.1.3 Kriyo-Elektron Mikroskopisi (Kriyo-EM)

Son yıllarda büyük bir atılım yapan Kriyo-EM, özellikle büyük makromoleküller komplekslerin yapısını belirlemede öne çıkmaktadır. Proteinler hızla dondurulur ve elektron mikroskopu ile görüntülenir.

- **Avantajı:** Kristalleşme gerekmez, büyük komplekslerde başarılıdır.
- **Dezavantajı:** Küçük proteinlerde çözünürlük sınırlı olabilir.

6 Ek 1: Amino Asitler ve Proteinler

6.4.2 Teorik Yöntemler

6.4.2.1 Homoloji Modellemesi

Eğer hedef proteine benzer bir proteinin yapısı biliniyorsa, bu yapı şablon olarak kullanılarak hedef proteinin olası yapısı tahmin edilir.

- **Avantajı:** Güvenilir şablon olduğunda iyi sonuç verir.
- **Dezavantajı:** Şablon bulunmadığında sınırlıdır.

6.4.2.2 Ab initio (de novo) Modelleme

Protein yapısı tamamen diziden yola çıkarak tahmin edilmeye çalışılır. Fiziksel prensipler veya istatistiksel yaklaşımalar kullanılır.

- **Avantajı:** Şablon gerektirmez.
- **Dezavantajı:** Özellikle büyük proteinlerde halen zorluklar vardır.

6.4.2.3 Yapay Zekâ Tabanlı Yöntemler

Son dönemde **AlphaFold** ve benzeri yapay zekâ tabanlı yöntemler, protein yapısı tahmininde çığır açmıştır. Bu sistemler, devasa protein veri tabanlarından öğrenilen bilgileri kullanarak oldukça doğru tahminler yapabilmektedir.

Sonuç olarak, protein yapısını belirleme çalışmaları, biyoinformatik ile yapısal biyolojinin kesişiminde yer almaktadır. Deneyel yöntemler atomik ayrıntıyı verirken, teorik yöntemler hız ve esneklik sağlar. Bu iki yaklaşımın birlikteliği, günümüzde protein biliminin en güçlü araçlarından birini oluşturmaktadır.

6.5 Protein Veri Tabanları

Proteinler için en temel deneysel veri kaynağı <https://www.rcsb.org/> web sitesinden ulaşabileceğimiz Protein Databank'tır.

TODO: A screenshot of PDB website. Bir protein dosyasının yapısı hakkında bilgiler sun. Bu bilgi sonradan dosya manipülasyonu hakkında çok yararlı olacaktır.

Ancak, milyonlarca protein içeren <https://alphafold.ebi.ac.uk/> sitesinden ulaşabileceğimiz AlphaFold veritabanı da deneysel yapısı bilinmeyen proteinler için oldukça iyi bir başlangıç noktasıdır.

6.6 Özet

- Amino asitler ortak bir omurga üzerinde farklı **R grupları** ile kimyasal çeşitlilik sunar.
- **Birincil yapı** sekansı, **ikincil yapı** yerel motifleri, **tersiyer yapı** tek zincirin 3B katlanması ve **kuaterner yapı** çoklu alt birimlerin montajını ifade eder.
- Bu hiyerarşi; katlanma, stabilité ve işlev arasındaki ilişkiyi anlamamın anahtarıdır.

7 Ek 2: Protein Moleküler Dinamik Simülasyonlarında Kuvvet Alanları

7.1 Giriş

Moleküler dinamik (MD) simülasyonları, proteinlerin ve diğer biyomoleküllerin atomik düzeydeki hareketlerini zaman içinde modellemek için kullanılan güçlü hesaplamalı yöntemlerdir. Bu simülasyonlarda temel amaç, Newton mekaniği yasalarına dayanarak atomların konumlarını ve hızlarını belirli zaman adımları boyunca güncellemektir. Ancak atomlar arası etkileşimlerin doğrudan kuantum mekaniği ile hesaplanması çok pahalı olduğundan, **empirik kuvvet alanları (force fields)** geliştirilmiştir. Kuvvet alanı, sistemdeki atomlar arasındaki potansiyel enerjiyi tanımlayan matematiksel fonksiyonlar ve parametreler bütünüdür.

Proteinlerin simülasyonunda kullanılan kuvvet alanları, hem kovalent bağların özelliklerini hem de bağısız (non-bonded) etkileşimleri tanımlar. Doğru bir kuvvet alanı seçimi, simülasyon sonuçlarının deneySEL verilerle uyumlu olabilmesi için kritik öneme sahiptir.

7.2 Kuvvet Alanlarının Genel Yapısı

Tipik bir biyomoleküler kuvvet alanı, potansiyel enerji fonksiyonunu şu bileşenlere ayırır:

$$E_{total} = E_{bond} + E_{angle} + E_{dihedral} + E_{nonbonded}$$

7.2.1 Bağ (Bond) terimi

Atom çiftleri arasındaki kovalent bağların uzamasını harmonik yay modeli ile tanımlar:

$$E_{bond} = \sum k_b(r - r_0)^2$$

Burada k_b bağ kuvvet sabiti, r anlık bağ uzunluğu ve r_0 denge bağ uzunluğuudur.

7.2.2 Açı (Angle) terimi

Üç atom arasındaki bağ açıları için harmonik yaklaşım kullanılır:

$$E_{angle} = \sum k_\theta(\theta - \theta_0)^2$$

7.2.3 Dihedral (Torsiyon) terimi

Dört atomdan oluşan zincirlerde dönme bariyerlerini tanımlar:

$$E_{dihedral} = \sum V_n[1 + \cos(n\phi - \gamma)]$$

Burada V_n dönme bariyeri yüksekliği, n periyod, ϕ torsiyon açısı ve γ faz kaymasıdır.

7.3 Protein Simülasyonlarında Kullanılan Başlıca Kuvvet Alanları

7.2.4 Bağsız (Non-bonded) etkileşimler

Van der Waals ve elektrostatik etkileşimleri içerir. Genelde Lennard–Jones potansiyeli ve Coulomb yasası ile ifade edilir:

$$E_{nonbonded} = \sum \left[\frac{A}{r^{12}} - \frac{B}{r^6} + \frac{q_i q_j}{4\pi\epsilon_0 r_{ij}} \right]$$

Burada A ve B Lennard–Jones sabitleri, q_i ve q_j kısmi yüklerdir.

7.3 Protein Simülasyonlarında Kullanılan Başlıca Kuvvet Alanları

Yukarıdaki denklemlerde bir sürü sabit parametre olduğunu gördük. Örneğin bağ enerjisini hesaplamak için k_b terimini bilmek gereklidir. İki amino birbirine bağlayan C ve N atomları arasındaki peptid bağı için $k_b(C - N)$ değerini nereden elde edeceğiz? Kuvvet alanlarını buna benzer sabitlerin bulunduğu veri setleri olarak değerlendirebiliriz. Biyomoleküllerin MD simülasyonlarında yaygın olarak -kendi içinde tutarlı- bazı veri setleri, bir başka deyişle kuvvet alanları aşağıda tanıtılmaktadır.

7.3.1 AMBER

AMBER (Assisted Model Building with Energy Refinement) aile kuvvet alanları proteinler, nükleik asitler ve ligandlar için yaygın olarak kullanılır. Öne çıkan versiyonlar: *ff14SB*, *ff19SB*. Ligand parametrizasyonu için **GAFF (General AMBER Force Field)** ve kısmi yük hesapları için RESP veya AM1-BCC yöntemleri tercih edilir.

7.3.2 CHARMM

CHARMM kuvvet alanı geniş kapsamlı parametre setleri sunar (protein, lipid, karbonhidrat vb.). *CHARMM36m* membran proteinleri ve lipid-protein etkileşimleri için sık tercih edilen bir versiyondur.

7.3.3 OPLS

OPLS-AA organik moleküllerin sıvı özelliklerini doğru tahmin etmesi ile bilinir; biyomoleküler simülasyonlarda da kullanılır.

7.3.4 GROMOS

GROMOS serisi, özellikle Avrupa kökenli birçok çalışmada tercih edilen klasik kuvvet alanıdır.

7.3.5 Yeni Nesil Kuvvet Alanları

- **Polarizable force fields (AMOEBA vb.)**: Elektron bulutunun polarizasyonunu hesaba katarak daha doğru elektrostatik modelleme sağlar.
- **ML tabanlı potansiyeller**: Derin öğrenme ve makine öğrenmesi yöntemleriyle kuantum hesaplamalarına yaklaşıcı potansiyeller geliştirilmektedir.

7.4 Kuvvet Alanı Seçiminde Dikkat Edilecek Noktalar

- **Protein tipi**: Membran proteinleri için CHARMM36; çözünür globüller proteinler için AMBER ff19SB gibi kombinasyonlar uygun olabilir.

7.5 Sık Yapılan Hatalar ve Öneriler

- **Su modeli:** Kuvvet alanına uygun bir su modeli seçilmelidir (ör. TIP3P, TIP4P-EW, OPC). Su modeli, özellikle protein yüzeyi ve iyon dağılımı üzerinde belirgin etkiler yapar.
- **İyonlar ve konsantrasyon:** İyon parametrisasyonu ve iyon konsantrasyonu (NaCl, KCl) biyolojik koşulları yansıtmalıdır.
- **Ligand/kofaktör parametrisasyonu:** Antechamber (AMBER), CGenFF (CHARMM) gibi araçlarla ligand parametreleri çıkarılmalıdır.
- **Polarizasyon gereksinimi:** Yüksek doğruluk gereken hesaplamlarda polarizable kuvvet alanları düşünülmelidir.
- **Simülasyon amaçları:** Katlanma, bağlanma serbest enerjisi hesapları, uzun zaman ölçüği dinamikleri gibi farklı amaçlar farklı yaklaşımalar gerektirir.

7.5 Sık Yapılan Hatalar ve Öneriler

- Kuvvet alanı ile uyumsuz su modeli kullanmak.
- Ligand parametrisasyonunu ihmali etmek veya hatalı parametre kullanmak.
- Kısa dengeleme süreleriyle üretmeye geçmek.
- Kesme (cutoff) ve uzun menzilli etkileşimler için uygun algoritmalar (PME vb.) kullanılmamak.

7.6 Özeti

Kuvvet alanları, MD simülasyonlarının temelini oluşturur. AMBER, CHARMM ve OPLS gibi klasik kuvvet alanları günümüzde yaygın olarak kullanılmakta; ancak polarizable kuvvet alanları ve makine öğrenmesi tabanlı yaklaşımalar daha yüksek doğruluk vaat etmektedir. Simülasyonun amacına göre uygun kuvvet alanı, su modeli ve parametrisasyon stratejisi seçilmesi simülasyonun başarısı için kritik önemdedir.

8 Ek 3: Bash Komut Satırı

8.1 Giriş

Moleküler dinamik simülasyonları gibi hesaplamalı çalışmalar yapılırken komut satırı kullanımı vazgeçilmezdir. Linux/Unix tabanlı sistemlerde **Bash** (Bourne Again Shell), en yaygın kullanılan kabuk (shell) ortamıdır. Ubuntu ve Mac OS'ta komut satırını kullanabilmek için Terminal adındaki uygulamaya başlatmak zorundasınız. Terminal komutlarını çalıştmak ilk başta size zor gelse de uzun vadede işlerinizi inanılmaz kolaylaştıracaktır. Aşağıda günlük işlerde sıkça kullanılan temel Bash komutları özetlenmiştir.

8.2 Dosya ve Dizin İşlemleri

Komut	Açıklama	Örnek
<code>pwd</code>	Bulundığınız dizini gösterir	<code>pwd</code>
<code>ls</code>	Dizin içeriğini listeler	<code>ls -l</code>
<code>cd</code>	Dizin değiştirir	<code>cd simulations/</code>
<code>mkdir</code>	Yeni dizin oluşturur	<code>mkdir data</code>
<code>rm</code>	Dosya veya dizin siler	<code>rm file.txt, rm -r old_dir</code>

8.3 Dosya Görüntüleme

Komut	Açıklama	Örnek
cat	Dosya içeriğini görüntüler	cat notes.txt
less	Uzun dosyaları sayfa sayfa gösterir	less results.log
head	İlk satırları görüntüler	head -n 20 data.txt
tail	Son satırları görüntüler	tail -f log.txt

8.4 Kopyalama ve Taşıma

Komut	Açıklama	Örnek
cp	Dosya veya dizin kopyalar	cp file1.txt backup.txt
mv	Dosya veya dizin taşır/yeniden adlandırır	mv old.txt new.txt

8.5 Arama ve Filtreleme

Komut	Açıklama	Örnek
grep	Dosyada metin arar	grep "ERROR" log.txt
find	Dosya/dizin arar	find . -name "*.pdb"
wc	Satır, kelime, karakter sayar	wc -l data.txt

8.6 Süreç ve Kaynak Yönetimi

Komut	Açıklama	Örnek
ps	Çalışan süreçleri listeler	ps aux
top	Gerçek zamanlı süreç takibi	top
kill	Belirtilen süreci sonlandırır	kill 12345

8.7 Dosya Aktarımı

Komut	Açıklama	Örnek
scp	Dosyayı uzak makineye kopyalar	scp file.txt user@server:/home/user/
rsync	Senkronize kopyalama yapar	rsync -av data/ backup/

8.8 Program Kurma

Ubuntu ve türevi işletim sistemlerin program kurmanın en kolay yolu program adminin önüne sudo apt install yazmaktr. Örneğin Gromacs programını kurmak için sudo apt install gromacs yazmak yeterli olur.

8 Ek 3: Bash Komut Satırı

Burada Gromacs kelimesinin ve komuttaki öteki harflerin küçük olduğuna dikkat etmek gereklidir. Program, Ubuntu veri tabanlarında mevcutsa işletim sistemi sizden yönetici şifresini soracak ve sonra programı kuracaktır.

Burada, Linux işletim sisteminde harflerin büyük veya küçük yazılması aynı sonucu vermeyeceğini ve bunlara dikkat edilmesi gerektiğini belirtmek gereklidir. ## Alıştırmalar

Not

1. Bulundığınız dizinin tam yolunu yazdırın.
İpucu: `pwd`
2. Bir dizindeki .pdb uzantılı dosyaların sayısını bulun.
İpucu: `ls *.pdb | wc -l`
3. `simulation.log` adlı dosyanın son 20 satırını ekranda gösterin.
İpucu: `tail -n 20 simulation.log`
4. `data/` klasörünü `backup/` klasörüne kopyalayın.
İpucu: `cp -r data backup`
5. `log.txt` dosyasında “ERROR” geçen satırların sayısını bulun.
İpucu: `grep -c "ERROR" log.txt`
6. `pdb2pqr` programını kurun.
İpucu: `sudo apt`

8.9 Sonuç

8.9 Sonuç

Bu komutlar, günlük kullanımında en çok ihtiyaç duyulan Bash araçlarıdır. Moleküler dinamik simülasyonlarının kurulumu ve analizi sırasında bu komutların bilinmesi, iş akışlarını büyük ölçüde hızlandırır.

9 Kaynaklar

9.1 Ders Kitapları

- Frenkel, D., & Smit, B. (2001). *Understanding Molecular Simulation*.

 Not

Nisbeten eski bir kitap. Hala C ile örnekler içeriyor.

- Rapaport, D. C. (2004). *The Art of Molecular Dynamics Simulation*.

9.2 Derleme Makaleler

- Hollingsworth, S. A., & Dror, R. O. (2018). Molecular dynamics simulation for all. *Neuron*, 99(6), 1129-1143.
- Karplus, M., & McCammon, J. A. (2002). Molecular dynamics simulations of biomolecules. *Nature structural biology*, 9(9), 646-652.

