



الجمهورية العربية السورية

جامعة دمشق

كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

قسم: هندسة التصميم الميكانيكي

نمذجة عملية تلبيس المضغوطات

باستخدام طريقة العناصر المتقطعة

رسالة مقدمة لنيل درجة الماجستير في أتمتة الإنتاج

إعداد:

م. شروق أحمد سعد الدين

إشراف

د. محمد بسام أبو حرب

العام الدراسي

2022-2021

تمّ إجراء التعديلات المطلوبة في هذه الأطروحة
وتعد هذه النسخة النهائية المعتمدة لأطروحة الماجستير للمهندسة
شروق أحمد سعدالدين

	أ.د غسان حداد
	أ.د محمد نادر زيدان
	د.محمد بسام أبو حرب

فهرس المحتويات

فهرس المحتويات

3	فهرس المحتويات
6	قائمة الأشكال
8	قائمة الجداول
10	الفصل الأول
11	1- أهمية البحث:
11	2- هدف البحث:
12	3- مبررات البحث:
12	4- مقدمة عامة عن طريقة العناصر المنقطعة:
14	5- التطبيقات:
15	6- مجالات العمل باستخدام طريقة DEM:
16	7- طرق النمذجة الرئيسية:
16	7-1 طريقة العناصر المستمرة (Continuum Element Method):
17	7-2 طريقة العناصر المنقطعة (DEM) Discrete Element Method:
18	7-3 مقارنة بين طريقة العناصر المنقطعة والمستمرة:
18	8- إيجابيات طريقة DEM وسلبياتها ودوافعها:
18	8-1 إيجابيات الطريقة:
19	8-2 سلبيات الطريقة:
20	8-3 دوافع استخدام الطريقة:
21	9- بارامترات النمذجة [2]:
21	9-1 خصائص الجسيمات المراد دراستها:
21	9-2 خصائص علاقة الجسيمات ببعضها ببعض:
22	9-3 القيم والنتائج المحسوبة نتيجة المحاكاة:
22	10- مخطط التدفق الرئيس:
24	11- البرمجيات المتخصصة بطريقة DEM:
24	11-1 حزم البرمجيات مفتوحة المصدر وغير التجارية:
25	11-2 حزم البرمجيات التجارية:
26	12- لمحة تعريفية عن برنامج EDEM المستخدم في البحث:
26	13- أمثلة العمل على برنامج EDEM:

13-1	مثال الناقل اللولبي:	29
13-2	مثال سرير المجفف:	29
13-3	مثال ديناميك الجزيئات:	30
14-	مخطط مراحل محاكاة DEM	30
31	الفصل الثاني	
1-	المبادئ الرئيسية لطريقة العناصر المتقطعة DEM	32
1-1	حساب حركة الجزيئات:	33
1-2	قانون قوة الانتقال (الإزاحة):	34
1-3	العلاقة بين قوانين نيوتن وقانون الانتقالات:	34
2-	قوى الاتصال وقوى عدم الاتصال:	35
1-2	قوى عدم الاتصال في DEM	36
2-2	قوى الاتصال في DEM:	39
3-	نماذج قوى الاتصال:	41
4-	نماذج لسلوك مواد مختلفة:	42
5-	كشف الاتصال:	44
6-	منهجي النمذجة للعناصر المتقطعة:	45
7-	أهمية تحديد الخطوة الزمنية:	48
8-	موجات رابلي السطحي:	48
9-	اختيار الخطوة الزمنية النموذجية:	49
10-	اقتران EDEM والمحاكاة المشتركة:	51
10-1	اقتران EDEM-FEA	51
10-2	اقتران DEM-MBD	51
10-3	اقتران DEM-CFD	52
11-	تطبيق القوى على الجزيئات:	53
56	الفصل الثالث	
1-	مقدمة:	57
2-	مخطط البارامترات المتغيرة والمؤثرة في عملية التلبيس:	58
3-	استكشاف أخطاء عملية التلبيس والحلول المقترحة:	60
4-	توزيع السرعة في منطقة البخ:	61
5-	زمن فترة البخ:	61
6-	زمن دورة السرير	62
63	الفصل الرابع	

64	أولاً: الأتمتة والنمذجة:
71	ثانياً الإجراء العملي
71	1- هدف الدراسة:
72	2- خطوات العمل:
81	3- معامل الاختلاف في توزيع كتلة التلبيس (COV_{INTER}):
82	4- بارامترات المستحضر (دراسة حالة):
84	5- استعراض النتائج التجريبية في المخبر:
84	5-1 خطوات العمل:
95	6- إجراءات استخلاص النتائج من البرنامج (SIMULATION RESULTS)
95	6-1 الخطوة الأولى :
97	6-2 الخطوة الثانية :
98	6-3 الخطوة الثالثة:
100	6-4 الخطوة الرابعة :
102	6-5 الخطوة الخامسة:
105	7- مقارنة بين نتائج المحاكاة والنتائج المخبرية:
107	8- الدراسة الإحصائية:
110	9- نتائج النمذجة
115	الفصل الخامس
116	1- النتائج:
117	2- المقارنة مع الدراسات المرجعية :
118	3- الآفاق المستقبلية:
120	4- توصيات البحث :
122	قائمة المراجع
126	ABSTRACT

قائمة الأشكال

- الشكل 1 التفاعل بين الجسيمات الإفرادية عند نقاط الاتصال. 14
- الشكل 2 مجالات استخدام طريقة dem. 15
- الشكل 3 منهج طريقة العناصر المستمرة. 16
- الشكل 4 منهج طريقة العناصر المنقطعة. 17
- الشكل 5 المخطط التدفقي للعملية (process flow chart) [3]. 23
- الشكل 6 الاختصاصات الثلاثة الرئيسة لبرنامج EDEM. 27
- الشكل 7 التطبيقات الصيدلانية لبرنامج EDEM. 27
- الشكل 8 نماذج تطبيقات EDEM كالخلط والمزج الرطب. 28
- الشكل 9 تطبيقات EDEM في التلبيس ودراسة الحجم المضاف وزمن الإقامة. 28
- الشكل 10 الناقل اللولبي. 29
- الشكل 11 سرير المجفف. 29
- الشكل 12 بعض الأمثلة للتطبيقات الصناعية كالخلط والتلبيس. 30
- الشكل 13 مخطط مراحل محاكاة EDEM. 30
- الشكل 14 القوانين الرئيسة لطريقة dem. 32
- الشكل 15 قوى الاتصال بين الجزيئات. 34
- الشكل 16 العلاقة بين قوانين نيوتن وقانون الانتقالات. 35
- الشكل 17 مخطط يبين القوى الناتجة عن الاتصال والقوى الناتجة عن عدم الاتصال. 36
- الشكل 18 رسم توضيحي للتداخل الظاهري بين العناصر في DEM. 40
- الشكل 19 منهج الكرات اللينة. 46
- الشكل 20 خطوة زمن رابلي. 49
- الشكل 21 الخطوة الزمنية النموذجية. 50
- الشكل 22 اقتران DEM-FEA لتحليل أحمال جرافة شاحنة التفريغ. 51
- الشكل 23 محاكاة DEM-MBD لدلو السحب. 52
- الشكل 24 نموذج DEM-CFD لديناميكيات تعويم الجسيمات. 53
- الشكل 25 تطبيق القوى على الجزيئات. 54
- الشكل 26 عملية تلبيس المضغوطات. 57
- الشكل 27 بارامترات الجودة لعملية التلبيس. 58
- الشكل 28 توزيع السرعة في منطقة البخ. 61

- الشكل 29Cov ، للتجارب والمحاكاة كمخطط شريطي. 68
- الشكل 30 حَلّة التلبيس المخبرية وهي تحتوي على 0.66 كغ من المضغوطات البيضاء. 72
- الشكل 31 حَلّة التلبيس المخبرية في برنامج SOLIDWORK 74
- الشكل 32 حَلّة التلبيس المخبرية بعد تصديرها لبرنامج EDEM. 75
- الشكل 33 محور الدوران لحَلّة التلبيس. 75
- الشكل 34 الشكل الهندسي ثلاثي الأبعاد للمضغوظة في برنامج SOLIDWORK. 76
- الشكل 35 المسقط الرأسي والأفقي والجانب للمضغوظة. 76
- الشكل 36 إنشاء جزيئات من القالب في برنامج edem. 78
- الشكل 37 صورة توضيحية لفرد البخ المستخدم ماركة schlick. 79
- الشكل 38 بارامترات فرد البخ. 79
- الشكل 39 بارامترات سرعة البخ. 81
- الشكل 40 حَلّة التلبيس المخبرية المراد دراستها. 83
- الشكل 41 مخطط العلاقة بين الزمن ووسطى كتلة 10 مضغوطات تجريبياً mg. 85
- الشكل 42 المنحني البياني للعلاقة الخطية من الدرجة الأولى بين كتل المضغوطات الملبسة تجريبياً والزمن. 87
- الشكل 43 المنحني البياني للعلاقة بين الكتل التجريبية والزمن لكثير الحدود من الدرجة الثانية. 87
- الشكل 44 المنحني البياني لمعادلة كثير حدود من الدرجة الثالثة بين كتل المضغوطات الملبسة تجريبياً والزمن المستهلك 89
- الشكل 45 العلاقة بين الزمن والكتلة المضافة mg تجريبياً. 91
- الشكل 46 منحني الانحراف المعياري في نتائج الكتلة المضافة للنتائج التجريبية. 94
- الشكل 47 الحجم المضاف والمكتسب من سائل التلبيس للمضغوطات. 97
- الشكل 48 مخطط العلاقة بين الزمن بالدقيقة والكتلة المضافة mg من النمذجة. 98
- الشكل 49 العلاقة بين الزمن ومعامل الاختلاف في كتلة التلبيس COV. 100
- الشكل 50 منحني الانحراف المعياري في نتائج الكتلة المضافة لنتائج المحاكاة. 100
- الشكل 51 المنحني البياني الأسّي المستنتج للاستقراء الرياضي للعلاقة بين الزمن و cov. 103
- الشكل 52 مخطط المقارنة بين مقدار الزيادة في الكتلة تجريبياً ومقدار الزيادة في الكتلة من المحاكاة. 106
- الشكل 53 السرعة الخطية للمضغوطات. 111
- الشكل 54 العلاقة بين الزمن والسرعة الخطية للمضغوطات. 111
- الشكل 55 السرعة الزاوية للمضغوطات. 112
- الشكل 56 مقارنة نتائج cov_inter من النمذجة ومن المعادلة في الدراسات المرجعية. 113

قائمة الجداول

18	جدول 1 المقارنة بين طريقتي العناصر المتقطعة والمستمرة [3]
24	جدول 2 حزم برامج DEM مفتوحة المصدر :
25	جدول 3 حزم برامج DEM التجارية
47	جدول 4 مقارنة بين منهجي المجال الصلب والمجال اللين [2]
60	جدول 5 مشاكل عملية التلبيس والأسباب وال حلول [9]
66	جدول 6 دراسة 63 حالة نمذجة لتلبيس المضغوطات عند بارامترات مختلفة
72	جدول 7 خصائص bulk material لكل من المضغوطات وسائل التلبيس:
73	جدول 8 الخواص الهندسية لحلة التلبيس:
73	جدول 9 معاملات التفاعل
74	جدول 10 مواصفات حلة التلبيس المخبرية المستخدمة
77	جدول 11 إجراءات إنشاء الجزيئات من القالب
79	جدول 12 مواصفات فرد البخ وضبطه في النمذجة:
80	جدول 13 مصنع جزيئات البخ
81	جدول 14 بارامترات المحاكاة (simulator)
82	جدول 15 بارامترات المستحضر :
84	جدول 16 النتائج التجريبية في المخبر :
88	جدول 17 حساب نسبة الخطأ عند التعويض بمعادلة كثير الحدود من الدرجة الثانية
92	جدول 18 العلاقة بين الزمن بالدقيقة، وكتلة المضغوطات والكتلة المضافة mg:
93	جدول 19 العلاقة بين التوزيع الطبيعي والانحراف المعياري للنتائج التجريبية:
97	جدول 20 نتائج برنامج edem لكل من الزمن بالدقيقة والكتلة المضافة mg:
99	جدول 21 العلاقة بين الزمن بالدقيقة ومعامل الاختلاف النسبي للكتلة المضافة (coefficient of variation)
101	جدول 22 العلاقة بين التوزيع الطبيعي والانحراف المعياري لنتائج المحاكاة:
104	جدول 23 العلاقة بين الزمن بالدقيقة والاستقرار الرياضي لقيمة الانحراف المعياري cov:
105	جدول 24 مقارنة بين النتائج المخبرية ونتائج المحاكاة:
108	جدول 25 نتائج الاختبار الإحصائي (t-Test Paired Two Sample for Means) بواسطة برنامج الإكسل:
113	جدول 26 مقارنة بين قيمة الانحراف النسبي الناتج من النمذجة ومن القانون 24 من الدراسات المرجعية

الملخص

تم إجراء محاكاة لنمذجة عملية تلبيس المضغوطات الدوائية باستخدام أحد برامج النمذجة والمحاكاة والمعتمد على طريقة العناصر المتقطعة (DEM) (Discrete Element Method) بالاستفادة من بارامترات مخبر البحث والتطوير لأحد المعامل المختصة بالصناعات الدوائية حيث تم إجراء محاكاة DEM مع

حزمة برنامج (EDEM 2021 (DEM Solutions Ltd., Edinburgh, UK)

تمت دراسة تأثير البارامترات الأساسية في عملية تلبيس المضغوطات الدوائية، وهي: الشكل الهندسي للمضغوطات والشكل الهندسي لحلة التلبيس، وسرعة دوران حلة التلبيس، وحمولة حلة التلبيس، وموضع وزاوية فرد البخ، والخواص الفيزيائية لقطيرات البخ، وكثافة سائل التلبيس، وكثافة المضغوطات، وتدفق سائل التلبيس المستخدم، ونسبة المواد الصلبة الموجودة في سائل التلبيس، ووجود مجاذيف في حلة التلبيس لتحقيق التجانس في الحركة وتأمين عدم حصول نقاط ممتدة، وزمن عملية التلبيس، ومعاملات الاحتكاك السكوني والتدحرجي بين المضغوطات وقطيرات البخ وجسم الحلة المعدني..... الخ. ختاماً تم التأكد من النتائج عن طريق إجراء دراسة إحصائية للتأكد من مطابقة النتائج التجريبية في المخبر مع النتائج الحاسوبية من برنامج المحاكاة ومقارنة النتائج مع الدراسات المرجعية المتوافقة معها أو المختلفة معها.

الكلمات المفتاحية: طريقة العناصر المتقطعة، محاكاة، نمذجة.

Keywords: DEM (Discrete Element Method), simulation, modeling.

الفصل الأول

التعريف بالبحث

نعرض في هذا الفصل تعريفاً بموضوع البحث.

1- أهمية البحث:

تعدّ عملية تلبيس المضغوطات من أهم العمليات في صناعة المستحضرات الدوائية، وهي عملية تغليف المضغوطة بطبقة لحمايتها من العوامل الخارجية، مثل: الضوء أو الرطوبة أو لتوجيه تحرّر المادة الفعّالة، أو لتحسين المظهر أو الرائحة أو الطعم للمضغوطات المُلبَّسة لزيادة تقبّل المريض له، كما تُعدّ عملية ضبط البارامترات الفيزيائية المؤثرة في عملية التلبيس أمراً بالغ الأهمية لما يؤثر ذلك في جودة المنتج النهائي، حيث إنّهُ يُعدّ الخطأ الناتج في اختلاف سماكة طبقة التلبيس أو كتلة المضغوطات الناتجة أو مشاكل المضغوطات الناتجة بعد التلبيس وعيوبها سبباً في إتلاف التحضيرات الدوائية.

2- هدف البحث:

الحصول على مضغوطات ذات جودة عالية من حيث التجانس في كتلة طبقة التلبيس المكتسبة للمضغوطات وذلك من خلال محاكاة العملية حاسوبياً؛ وبالتالي تقليل الكلفة الناتجة عن التجارب الماديّة، حيث سيتم اعتماد مبدأ validation أي التحقق من عملية تلبيس مخبرية في أحد معامل الأدوية وذلك بتطبيق البارامترات المطبقة في مخبر البحث والتطوير في المعمل

(Research and development laboratory) على أحد برامج النمذجة الحاسوبية المختصة

بطريقة العناصر المتقطعة (DEM (Discrete Element Method وتم العمل على حزمة برنامج

EDEM 2021 المقدم من شركة (DEM Solutions Ltd., Edinburgh, UK).

تمت مقارنة النتائج التجريبية في المخبر مع نتائج النمذجة الحاسوبية، وبيان مدى الدقة والوثوقية في

برامج النمذجة؛ وبيان اعتمادها على المجال الإنتاجي.

3- مبررات البحث:

يتم في مخابر ضبط الجودة إجراء البحوث والتجارب الحقيقية على نطاق ضيق، ولكن عند الانتقال

إلى جُل التلبيس الصناعية الكبيرة فإن إجراء التجارب على كميات كبيرة يصبح أكثر كلفةً وهدراً

لوقت. وعلى النقيض من ذلك فإن عملية المحاكاة الحاسوبية توفر الوقت والجهد والمال، وتجعل من

الممكن تحليل خصائص العملية وتغيير بارامتراتنا بسهولة ونمذجتها بشكل مشابه تماماً للحقيقة،

والحصول على نتائج موثوقة و قابلة للتطبيق والاعتماد.

4- مقدمة عامة عن طريقة العناصر المتقطعة:

طريقة العناصر المتقطعة (DEM) (Discrete Element Method) والتي تسمى أيضاً طريقة

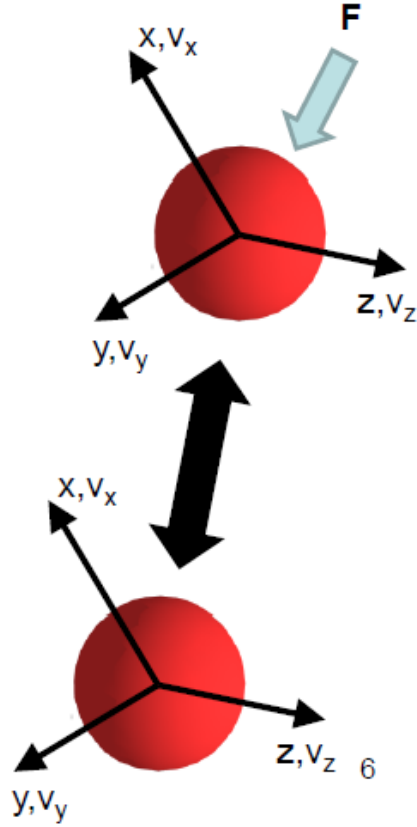
العناصر المستقلة (distinct element method)، هي إحدى مجموعات الطرق العددية لحساب حركة

عدد كبير من الجزيئات الصغيرة وتأثيرها. على الرغم من أن DEM ترتبط ارتباطاً وثيقاً بديناميكيات

الجسيمات. إلا أنها تتميز بتضمينها لدرجات الحرية الدورانية؛ فضلاً عن التلامس الدقيق والأشكال المعقدة والمتعددة. ومع التقدم في قوة الحوسبة والخوارزميات العددية أصبح من الممكن محاكاة ملايين الجسيمات على معالج واحد.

واليوم أصبحت DEM مقبولة على نطاق واسع كوسيلة فعالة لمعالجة المشاكل الهندسية في المواد الحبيبية وغير المستمرة، وخاصة في التدفقات الحبيبية، وميكانيك المساحيق، وميكانيك الصخور. في الآونة الأخيرة تم توسيع هذه الطريقة لتشمل أسلوب العنصر المنفصل الممتد مع مراعاة الديناميك الحراري والاقتران مع البرامج الخاصة بـ (Finite Element Method) (FEM) (طريقة العناصر المنتهية) وبرنامج ديناميك الموائع الحسابية (Computational Fluid Dynamics) (CFD).

تستدعي طرق العناصر المتقطعة وجود العديد من العمليات الحسابية المكثفة نسبياً ووجود إمكانات حاسوبية عالية مما يحد من طول المحاكاة أو عدد الجسيمات، تستفيد العديد من أكود DEM، وكذلك أكود ديناميكيات الجسيمات من إمكانات المعالجة المتوازية (الأنظمة المشتركة أو الموزعة) لزيادة عدد الجسيمات أو طول المحاكاة وهو بديل لمعالجة جميع الجسيمات بشكل منفصل؛ أي عن طريق اختيار المتوسط الفيزيائي عبر العديد من الجسيمات وبالتالي معالجة المادة على أنها سلسلة متصلة [1]. تعتمد طريقة العناصر المتقطعة على الملاحظة والوصف الرياضي للكائنات الإفرادية (الجسيمات والحبيبات)؛ أي عن طريق حسابات منفصلة ودراسة السمات الميكانيكية للهياكل المتقطعة على اعتبار أن التفاعلات بين الكائنات تحدث فقط عند نقاط الاتصال [2] كما في الشكل (1).



الشكل 1 التفاعل بين الجسيمات الإفرادية عند نقاط الاتصال.

5- التطبيقات:

الافتراض الأساسي للطريقة هو أن المادة تتكون من جسيمات منفصلة ومتقطعة. قد يكون لهذه

الجسيمات أشكال وخصائص مختلفة. بعض الأمثلة هي [2]:

المواد الحبيبية، مثل الرمال. 

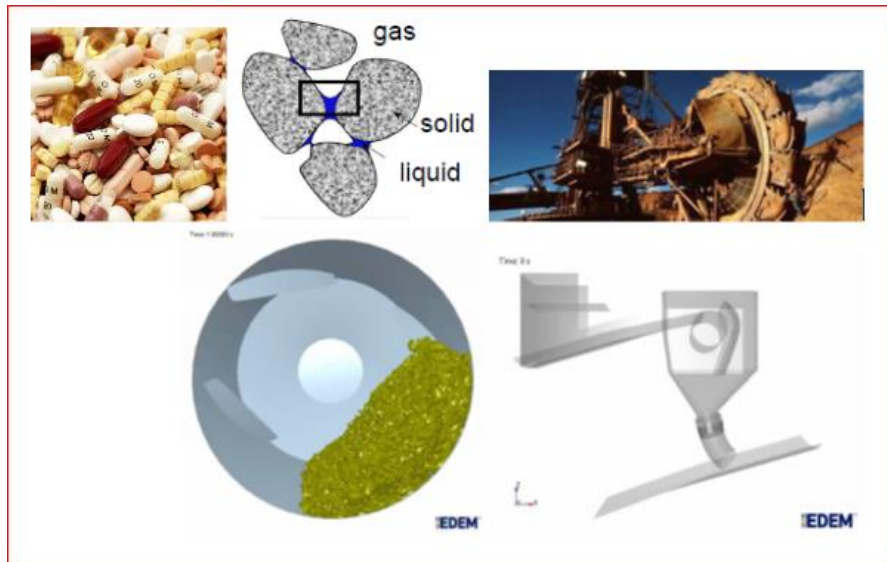
المساحيق. 

الكتل الصخرية الممتلئة أو المفصلية. 

6- مجالات العمل باستخدام طريقة DEM:

- صناعة bulk material (استخراج المعادن-علم المعادن-الزراعة).
- عمليات صياغة الجسيمات (صناعة الأسمدة -الصناعات الدوائية -الصناعات الغذائية -الصناعات الكيماوية).
- هندسة العمليات الميكانيكية والحرارية (التجفيف-أحداث الكسر-سلوك Bulk material، وخصائص النقل -أنظمة الطور المزدوج).
- مجالات أخرى كالهندسة المدنية، واستخراج النفط، والغاز، والتعدين، والتخصيب، ومساحيق المعادن [2].

كما يبين الشكل 2 مجالات استخدام طريقة dem:



الشكل 2 مجالات استخدام طريقة dem.

7- طرق النمذجة الرئيسة:

7-1 طريقة العناصر المستمرة (Continuum Element Method):

في هذه الطريقة يتم وصف سلوك المواد الحبيبية بالقوانين الأساسية، والتي يتم التعبير عنها

بشكل شائع بشكل معادلات تفاضلية تربط المتغيرات الميكانيكية (مثل الضغط والإجهاد).

يفترض نمذجة مادة بهذا النهج أنها مستمرة وتملأ المساحة التي تحتلها أو تشغلها تماماً. ونتيجة

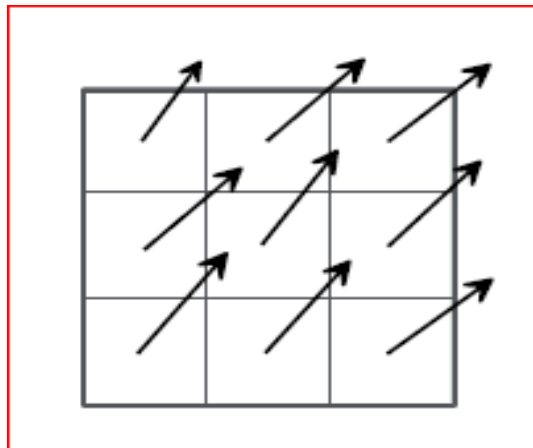
لذلك، يتم تجاهل سلوك الجسيمات الفردية. يتم حل المعادلات الأساسية الناتجة عددياً (على سبيل المثال

طريقة العناصر المنتهية) FEM.

يتم تجاهل التركيب الجزيئي أو البنية المجهرية أو التفاصيل الدقيقة للمواد، وتكون الدوال الرياضية

مستمرة إلا في عدد محدود من الأسطح الداخلية التي تفصل مناطق الاستمرارية [3]. كما هو موضح في

الشكل (3):



الشكل 3 منهج طريقة العناصر المستمرة.

7-2 طريقة العناصر المتقطعة (DEM): Discrete Element Method

إنّ مصطلح أسلوب العناصر المتقطعة هو أحد الطرق العددية لحساب حركة عدد كبير من

الجسيمات، مثل الجزيئات أو الحبيبات.

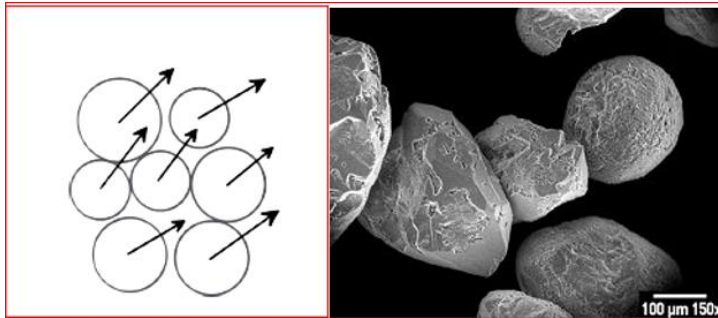
وعلى النقيض من منهج الاستمرارية، يعتمد مبدأ العناصر المتقطعة على تمثيل كل جسيم واحد

ككيان مستقل، وتمثل كل مادة حبيبية مجموعة مثالية من الجسيمات.

ينتج سلوك النظام الكلي (الماكروسكوبي) عن تفاعلات الجسيمات الفردية. وهذا يجعل النهج

المنفصل جيداً جدًا للتحقق من الظواهر التي تحدث على مقياس طول قطر الجسيم ومحاكاة سلوك

الجزيئات بكميات كبيرة. كما هو موضح في الشكل (4).



الشكل 4 منهج طريقة العناصر المتقطعة.

إنّ القضايا الحرجة في استخدام المنهج المستمر لنمذجة المواد الحبيبية هي إيجاد الصيغ المناسبة

للسلوك التأسيسي حيث غالباً ما تكون قوانين الإجهاد المناسبة للمواد غير موجودة أو معقدة للغاية. وغالباً

ما تعتمد ظواهر نظام الجسيمات اعتماداً كبيراً على سلوك مستوى الجسيمات.

ونظرًا لأنّ الميكانيك الدقيق للمواد الحبيبية يمكن تصميمه على نحو أكثر واقعية من خلال مناهج

منفصلة، فهي أكثر ملاءمة في نمذجة التدفق والتقطيع الكبير للمواد غير المستمرة [3].

7-3 مقارنة بين طريقة العناصر المتقطعة والمستمرة:

جدول 1 المقارنة بين طريقتي العناصر المتقطعة والمستمرة [3]

المقارنة من حيث	طريقة العناصر المتقطعة	طريقة العناصر المستمرة
المواد المدروسة	مواد غير مستمرة، وسائط حبيبية	مجموعة مستمرة
مبدأ العمل	تدرس سلوك الجزيئات الفردية.	يفترض أن المادة الحبيبية تشغل حيز الفراغ الذي تحتله.
القوانين والعلاقات	سلوك النظام الكلي ناتج عن تفاعل الجزيئات الفردية.	ترتبط الاجهادات والانفعالات بمعادلات تكوينية.

8- إيجابيات طريقة DEM وسلبياتها ودوافعها:

8-1 إيجابيات الطريقة:

❖ يمكن استخدام DEM لمحاكاة مجموعة واسعة من حالات التدفق الحبيبي وميكانيك الصخور

حيث طورت مجموعات بحثية عدة مستقلة برنامج محاكاة يتوافق بشكل جيد مع النتائج التجريبية

من خلال مجموعة واسعة من التطبيقات الهندسية، بما في ذلك المساحيق الملصقة، والتدفق

الحبيبي، والكتل الصخرية المتصلة.

❖ يسمح DEM بإجراء دراسة أكثر تفصيلاً للديناميكيات الدقيقة لتدفقات المسحوق؛ مما هو ممكن

باستخدام التجارب الفيزيائية. على سبيل المثال، يمكن تصور شبكات القوة المتكونة في وسائط

حبيبية باستخدام DEM. هذه القياسات تكاد تكون مستحيلة في التجارب مع جزيئات صغيرة

وكثيرة [1].

❖ هناك بعض المعادلات التي يجب حلها لكل كائن على حدة والتي عادة ما تكون غير قابلة

للقياس. ولكن بطريقة العناصر المتقطعة يمكن التحقق من القوى والحركات لكل كائن واحد في

داخل المنظومة [2].

8-2 سلبيات الطريقة:

❖ الحد الأقصى لعدد الجسيمات ومدة المحاكاة الافتراضية محدودة بواسطة القوة الحاسوبية. حيث

تحتوي التدفقات النموذجية على بلايين الجسيمات، ولكن عمليات محاكاة DEM المعاصرة

لموارد الحوسبة العنقودية الكبيرة تمكنت مؤخرًا فقط من الاقتراب من هذا المقياس لمدة طويلة بما

فيه الكفاية (وقت المحاكاة وليس وقت تنفيذ البرنامج الفعلي) [1].

❖ DEM-تتطلب قوة حاسوبية، وهذا هو السبب في أنه لم يتم اعتمادها على نطاق واسع مع

اقتراب التواصل في علوم الهندسة الحاسوبية والصناعة. ومع ذلك، يمكن تقليل أوقات تنفيذ

البرنامج الفعلي بشكل كبير عند استخدام وحدات المعالجة الرسومية (GPUs) لإجراء عمليات

محاكاة DEM؛ بسبب العدد الكبير من مراكز الحوسبة على وحدات معالجة الرسومات

النمذجيّة؛ فضلاً عن ذلك تميل وحدات معالجة الرسومات إلى أن تكون أكثر كفاية في

استخدام الطاقة من مجموعات الحوسبة التقليدية عند إجراء عمليات محاكاة DEM؛ يتطلب

حلّها على وحدات معالجة الرسومات (GPU) طاقة أقل من الطاقة التي يتم حلّها على مجموعة

الحوسبة التقليديّة [1] .

❖ تتكوّن أنظمة الجسيمات الحقيقية من مليارات العناصر والتوصيف الشامل لجميع هذه الجزيئات

غير ممكن، لذا فالحل الوسطي هو تبسيط النظام كما من الصعب جزئياً الحصول على

استنتاجات حول سلوك نظام مصانع الإنتاج الكبيرة الحقيقي [2].

8-3 دوافع استخدام الطريقة:

يمكن تحديد طريقة العنصر المنفصل (DEM) بدقة على أنها طريقة منفصلة لها القدرة على:

❖ حساب عدد مرات انتقالات الجسيمات المحدودة ودورانها.

❖ إجراء كشف عن نقاط الاتصال بين مجموعة من الجسيمات.

❖ نظراً لأن DEM يستخدم النهج المنفصل، فهو مناسب جداً لنمذجة السلوك الحر للمواد حيث

توفر محاكاة الوسائط غير المستمرة فهماً للعمليات، وتقلل من عدد التجارب الفيزيائية

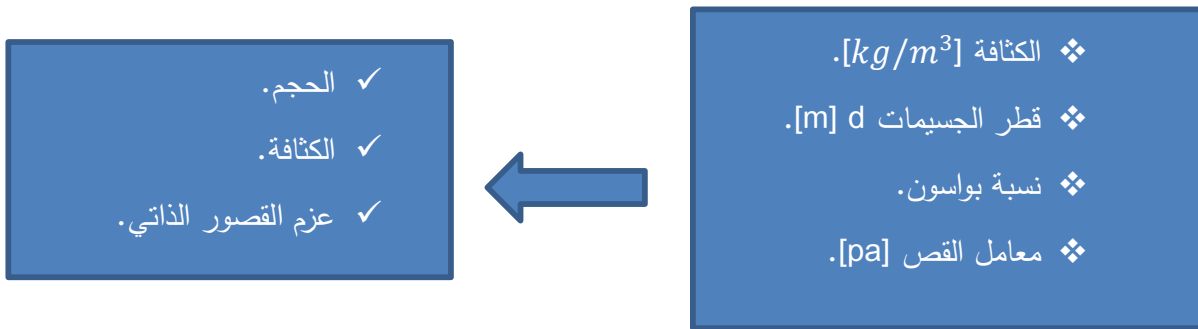
المطلوبة [3].

9- بارامترات النمذجة [2]:

9-1 خصائص الجسيمات المراد دراستها:

في البداية يجب تحديد خصائص الجسيمات المراد دراستها بدقة للحصول على الخصائص

الفيزيائية للمواد:



9-2 خصائص علاقة الجسيمات بعضها ببعض:

يحب تحديد البارامترات المحددة لعلاقة المواد بعضها ببعض (interactions)، وهي:

- ❖ معامل الارتداد (coefficient of restitution).
- ❖ معامل الاحتكاك الساكن (coefficient of static friction).
- ❖ معامل الاحتكاك التدرجي (coefficient of rolling friction).

9-3 القيم والنتائج المحسوبة نتيجة المحاكاة:

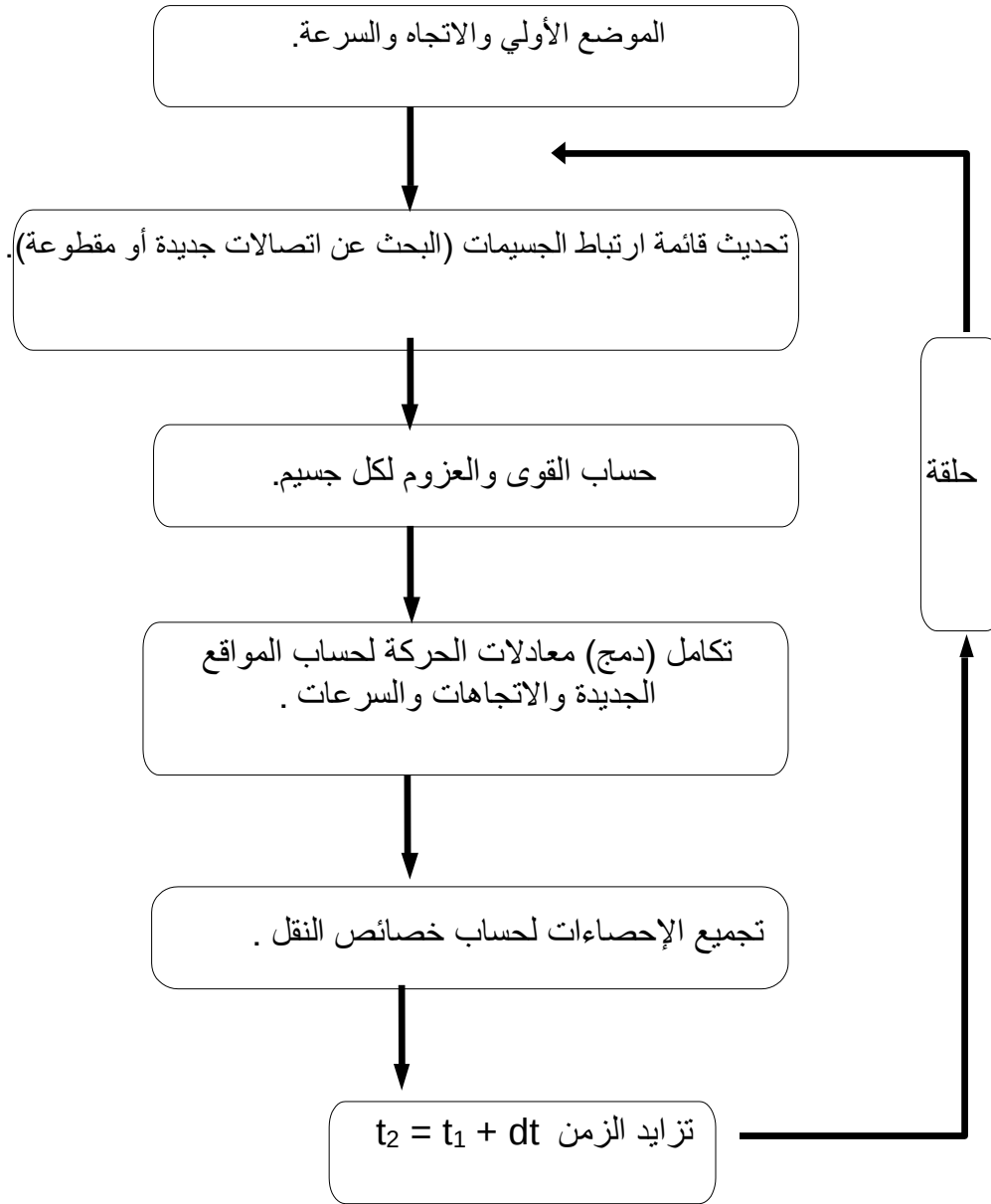
- ❖ الموقع (إحداثيات x, y, z).
- ❖ القيم المعتمدة على الزمن (السرعة الخطية - السرعة الزاوية - الكتلة - الحجم).
- ❖ الطاقة (الطاقة الكلية - الطاقة الكامنة - الطاقة الحركية - الطاقة الدورانية) القوى (القوى الكلية - قوى الضغط) كمية الحركة.
- ❖ علاقة الجسيمات بعضها ببعض (تردد الاصطدام - قوى القيود).

10- مخطط التدفق الرئيس:

يبين الشكل (5) مراحل العمل، ومخطط التدفق للعمليات داخل برمجيات DEM ؛ مما يؤمن

فهماً محسناً لطريقة عمل هذه البرمجيات [3].

يتم حسب القوى والعزوم بين الجسيمات لكل لحظة زمنية



الشكل 5 المخطط التدفقي للعملية (process flow chart) [3].

11- البرمجيات المتخصصة بطريقة DEM:

فيما يلي بعض البرمجيات المتخصصة بطريقة العناصر المنقطعة DEM بنوعيتها، وهي أولاً

البرمجيات مفتوحة المصدر وغير التجارية، وثانياً حزم البرمجيات التجارية [1].

11-1 حزم البرمجيات مفتوحة المصدر وغير التجارية:

جدول 2 حزم برامج DEM مفتوحة المصدر:

الرقم	اسم البرنامج	التعريف
1	BALL & TRUBAL (1979-1980)	تعتمد طريقة العنصر المتميز كود (FORTRAN) الذي كتبه في الأصل P. Cundall ويحتفظ به حالياً C.Thornton
2	Mercury-DPM	تم التطوير بواسطة Mercury LAB ، جامعة تقينتي (هولندا).
3	YADE	-
4	LIGGGHTS CFDEM	-
5	LAMMPS	تم تحسين برنامج الحبيبات العامة لمحاكاة حبيبات نقل الحرارة التي طوّرتها شركة DCS Computing GmbH
6	MFIX-DEM	تم تطويره بواسطة National Technology Laboratory (NETL-USA)
7	MechSys	تم تطويره بواسطة عدد قليل من الأشخاص وتحتفظ به حالياً شركة SA Galindo-Torres على جامعة ليفربول

11-2 حزم البرمجيات التجارية:

جدول 3 حزم برامج DEM التجارية

الرقم	اسم البرنامج	التعريف
1	UDECE3DEC	برنامج يدرس طريقة العناصر المستقلة ثنائية وثلاثية الأبعاد.
2	ChuteMaven	إنتاج شركة (Hustrulid Technologies, Inc.
3	PFC2D	(Particle Flow Code in 2 Dimensions) إنتاج شركة Itasca
4	PFC3D	Particle Flow Code in 3 (Dimensions) إنتاج شركة Itasca
5	EDEM	من إنتاج شركة DEM Solutions Ltd
6	GROMOS 96	-
7	ELFEN	إنتاج شركة Rockfield Software
8	PASSAGE®/DEM	-
9	Bulk Flow Analyst	-
10	Rocky DEM	هو أشهر البرامج التي تحاكي بسرعة وبدقة سلوك الجسيمات، وتقوم بنمذجة العناصر المتقطعة .
11	Three Particle/CAE	برامج محاكاة DEM للأشكال الفيزيائية الدقيقة والمتعددة والمدمجة في : FEA (Finite Element Analysis). MBD (Multi Body Dynamic). SPH (Smoothed Particle Hydrodynamic)
12	SimPARTIK	by Fraunhofer Institut

12- لمحة تعريفية عن برنامج EDEM المستخدم في البحث:

هو برنامج لتطبيق العمليات على الجسيمات مستخدماً العلامة التجارية® EDEM.

هو من إنتاج شركة DEM-Solutions Ltd.

أسست الشركة في عام 2002.

أول إصدار لـ EDEM في عام 2005.

التطورات مستمرة في البرنامج في كل نسخة سنوياً.

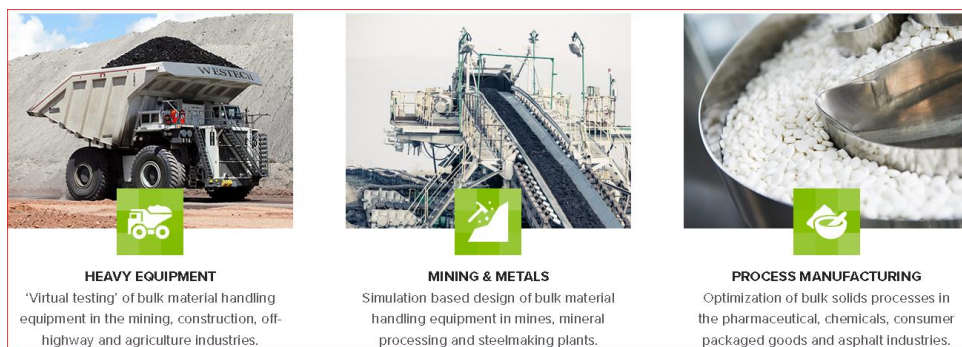
يتضمن البرنامج واجهة رسومية بسيطة للمستخدم.

هو أحد التطبيقات المتخصصة بطريقة العناصر المنقطعة DEM.

13- أمثلة العمل على برنامج EDEM:

يختص برنامج EDEM بالعديد من التطبيقات المتعلقة بالجزيئات منها، والاختصاصات الثلاثة

الرئيسية لتطبيق EDEM وهي صناعة العمليات والتعدين والمعدات الثقيلة كما في الشكل 6.



الشكل 6 الاختصاصات الثلاثة الرئيسة لبرنامج EDEM.

يبين الشكل 7 التطبيقات الصيدلانية في برنامج EDEM وهي مزج البودرة وتلبيس المضغوطات

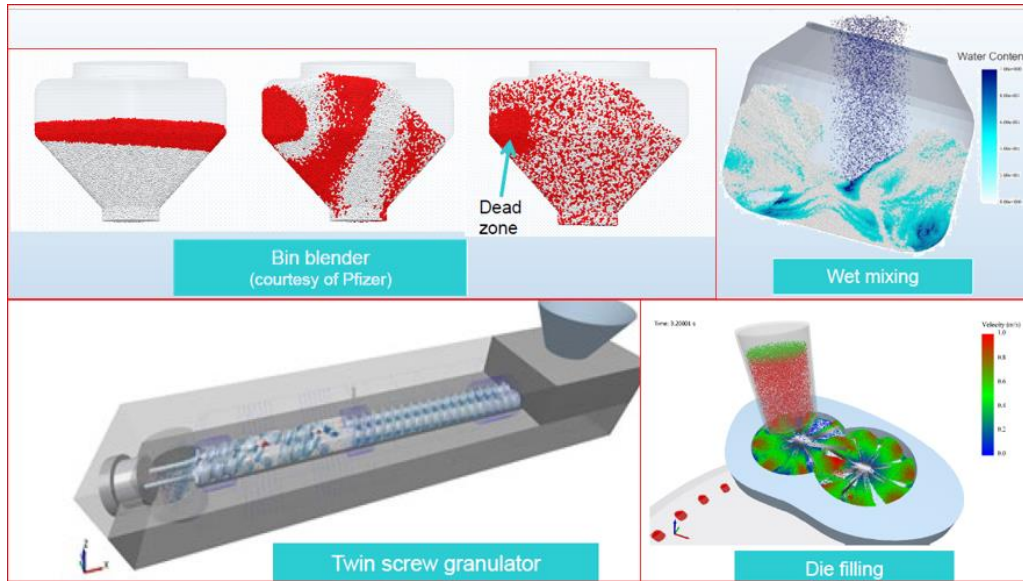
وطحن المضغوطات وتعبئة الأجران والتحثير والعجن وضغط المضغوطات وتجفيف البودرة وتلبيس

جزيئات البودرة.



الشكل 7 التطبيقات الصيدلانية لبرنامج EDEM.

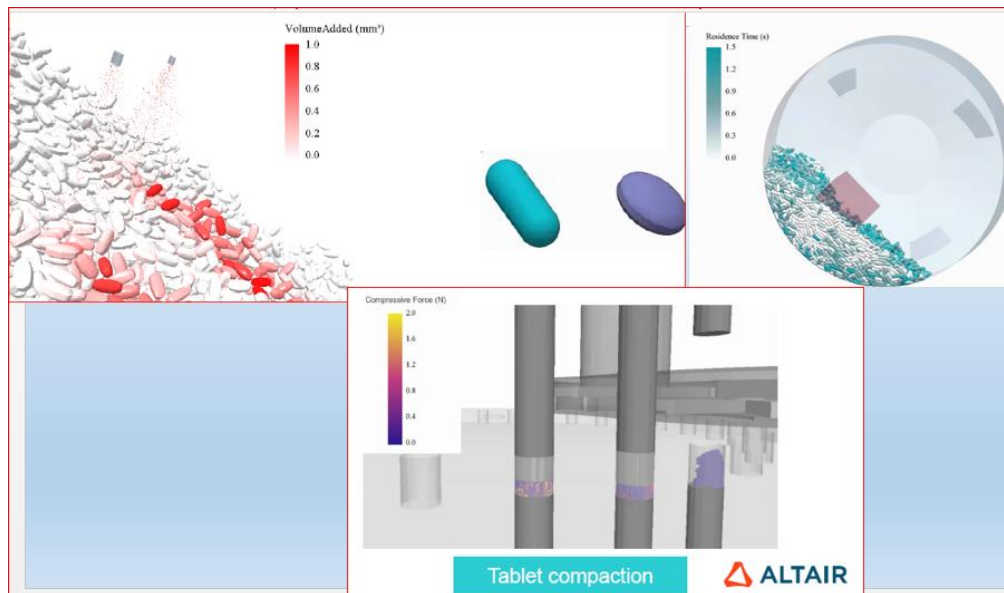
يبين الشكل 8 نماذج لتطبيقات برنامج EDEM ومنها خلط البودرة والمزج الرطب للإسمنت.



الشكل 8 نماذج تطبيقات EDEM كالخلط والمزج الرطب .

أما الشكل 9 يبين التطبيقات الصيدلانية، ومنها: تلبيس المضغوطات الدوائية وضغط

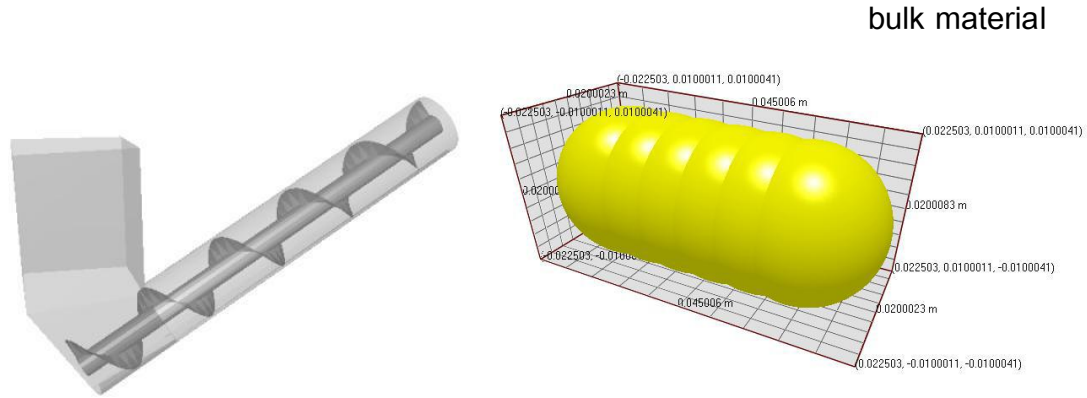
المضغوطات.



الشكل 9 تطبيقات EDEM في التلبيس ودراسة الحجم المضاف وزمن الإقامة.

1-13 مثال الناقل اللولبي:

في المثال التالي محاكاة لظواهر النقل للجزيئات الكروية في ناقل لولبي ذي حركة دورانية وهو يستخدم لنقل

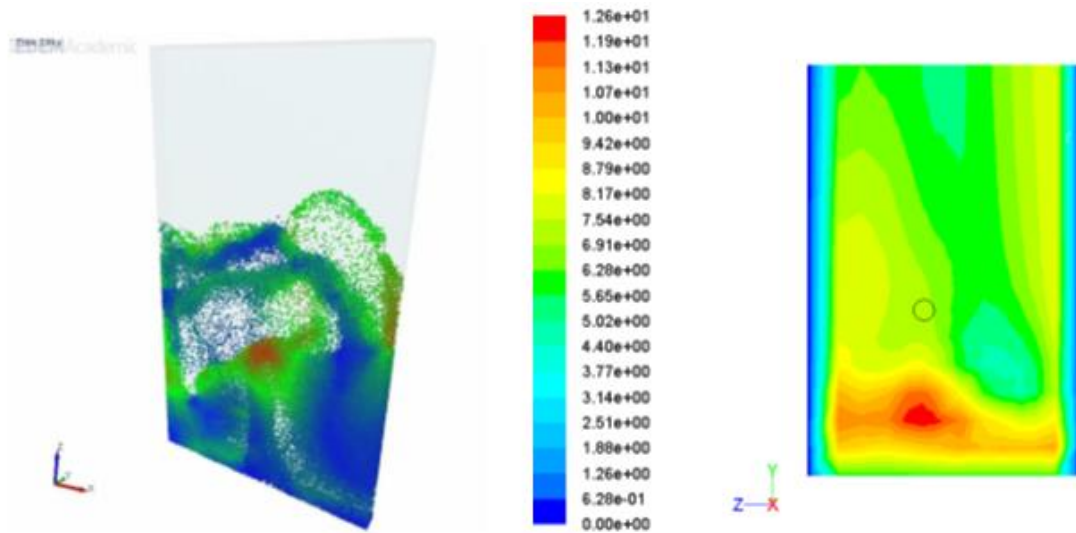


الشكل 10 الناقل اللولبي.

2-13 مثال سرير المجفف:

يبين الشكل (11) مثالاً عن نمذجة سرير المجفف حيث تتعرض جزيئات البودرة لتأثير تدفق،

ودرجة حرارة هواء بقيم معينة.

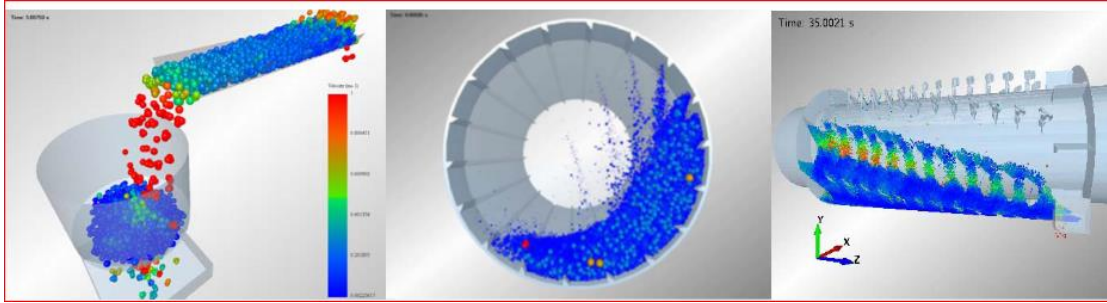


الشكل 11 سرير المجفف.

13-3 مثال ديناميك الجزيئات:

فيما يأتي الشكل (12) مثال عن نمذجة ديناميك الجزيئات عند خلط جزيئات البودرة وعمليات نقل

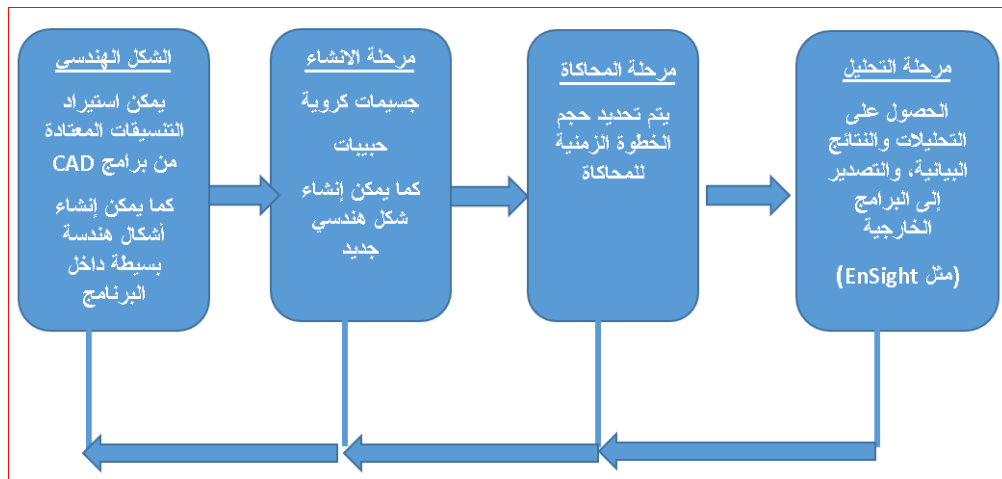
الحرارة والكتلة.



الشكل 12 بعض الأمثلة للتطبيقات الصناعية كالخلط والتليبيس.

14- مخطط مراحل محاكاة DEM

يبين الشكل (13) مراحل العمل الأساسية في برنامج EDEM.



الشكل 13 مخطط مراحل محاكاة EDEM.

الفصل الثاني

القوى ونماذج الاتصال والمناهج في

طريقة العناصر المتقطعة

نعرض ضمن هذا الفصل آلية العمل والأسس والقوانين النازمة لطريقة العناصر المتقطعة

1- المبادئ الرئيسة لطريقة العناصر المتقطعة DEM

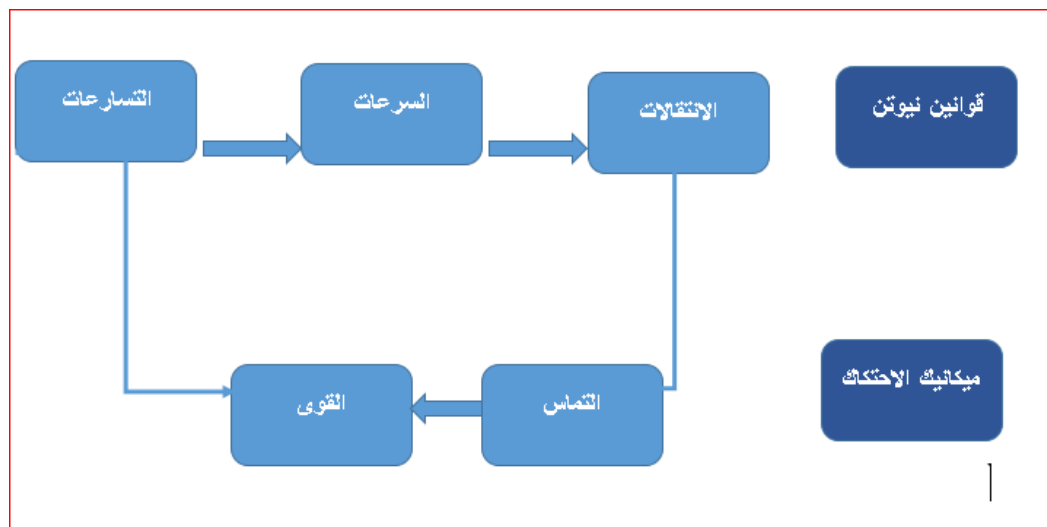
باستخدام خوارزميات الكشف عن مناطق التلامس، وتطبيق نماذج الاحتكاك المناسبة، فإن برنامج

EDEM قادر على حساب القوى المؤثرة في الجزيئات. ثم يتم حساب التسارع والسرعات والانتقالات

باستخدام قوانين نيوتن للحركة وإجراء التكامل العددي. وسيتم دراسة كل من المبادئ الأساسية وتفصيلها

في هذا الفصل. حيث يبين الشكل (14) العلاقة بين قوانين نيوتن وقوانين ميكانيك الاحتكاك في محاكاة

dem وهي القوانين الرئيسة لطريقة العناصر المتقطعة.



الشكل 14 القوانين الرئيسة لطريقة dem.

1-1 حساب حركة الجزيئات:

كل جسيم داخل تدفق حُببي لديه 6 درجات من الحرية ونتيجة لذلك يمكن أن يكون له نوعان

من الحركة: وهما حركة انسحابية وحركة دورانية. في عمليات محاكاة DEM ، يُستخدم قانون نيوتن الثاني

لحساب التسارع الخطي والدوراني والذي يتم بعد ذلك دمجاً عددياً على مدار خطوة زمنية لتحديث سرعة

الجسيمات ومواقعها [3].

تُحسب الحركة الدورانية بناءً على القانون التالي:

$$I \frac{d\omega}{dt} = M \quad (1)$$

I عزم القصور الذاتي $[kg.m^2]$

ω السرعة الزاوية $[rad/s]$

M محصلة العزوم المتلاقية والمؤثرة في الجسيم $[N.m]$

t الزمن $[s]$

تُحسب الحركة الانسحابية بناءً على القانون التالي:

$$m \frac{dv}{dt} = F_g + F_c + F_{nc} \quad (2)$$

حيث:

m كتلة الجسيم $[kg]$.

v السرعة الخطية للجسيم $[m/s]$.

F_g هي قوى الجاذبية المؤثرة عن الجسيم $[N]$.

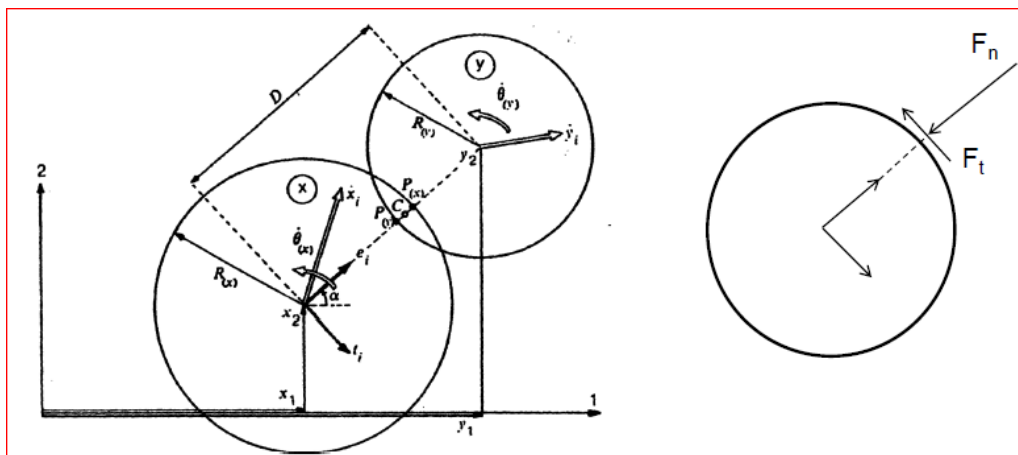
F_c, F_{nc} هي قوى الاتصال وعدم الاتصال الناتجة بين الجسيمات والجسيمات المحيطة بالجدران

$[N]$.

2-1 قانون قوة الانتقال (الإزاحة):

ينص القانون على إيجاد قوى الاتصال خلال التفاعل مع الإزاحات الناتجة لنماذج

العناصر المتصلة (الشكل 15).



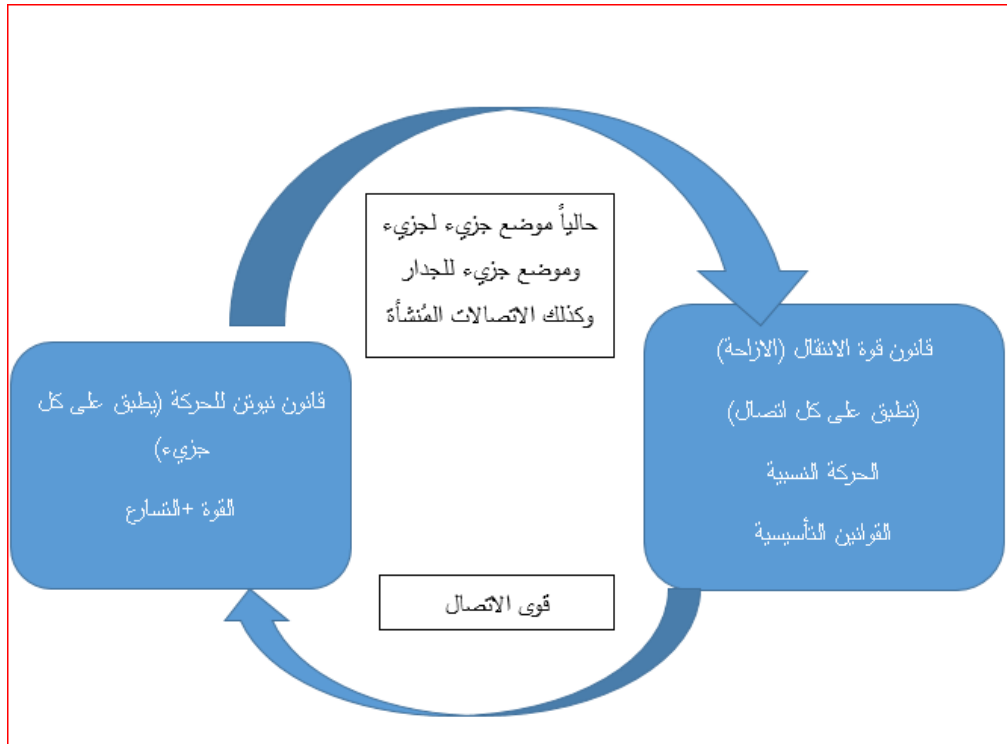
الشكل 15 قوى الاتصال بين الجزيئات.

3-1 العلاقة بين قوانين نيوتن وقانون الانتقالات:

هناك علاقة تربط بين قوانين نيوتن المطبقة على كل جسيم على حدة وقوانين قوة الانتقال

(الإزاحة) المطبقة بين كل اتصاليين لجزيئين حيث تستمر هذه التفاعلات بشكل حلقة مستمرة وراجعة حتى

نهاية النمذجة (الشكل 16).

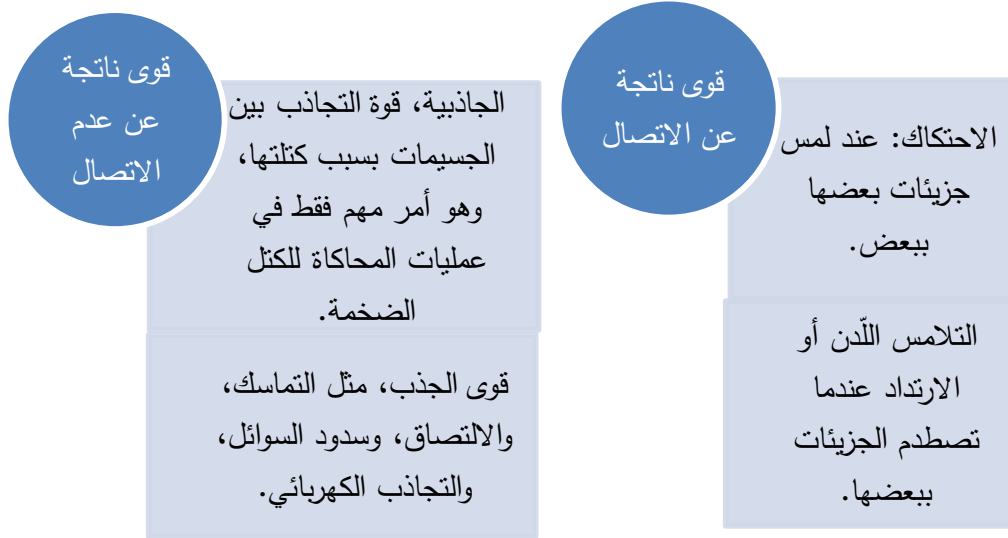


الشكل 16 العلاقة بين قوانين نيوتن وقانون الانتقالات.

2- قوى الاتصال وقوى عدم الاتصال:

قد يتعين مراعاة القوى التالية في عمليات المحاكاة وهي قوى ناتجة عن الاتصال وقوى ناتجة

عن عدم الاتصال (الشكل 17).



الشكل 17 مخطط يبين القوى الناتجة عن الاتصال والقوى الناتجة عن عدم الاتصال.

2-1 قوى عدم الاتصال في DEM

إنّ التفاعلات فيما بين الجسيمات ليست فقط بسبب التصادم والاتصال بين الجسيمات، إنما قد

تتفاعل الجسيمات بينما تكون منفصلة بعضها عن بعض، على سبيل المثال، في حالة الجسيمات

المشحونة، قد تؤثر قوى التجاذب أو التنافر في حركة الجزيئات. القسم التالي عبارة عن استعراض

موجز لقوى عدم الاتصال الشائعة التي قد تكون موجودة في أنظمة الجسيمات [4].

2-1-1 قوى فاندرفال (Van der Waals):

قوة فاندرفال: وتنتج من تجاذب نوى الذرات في جسيم معين مع إلكترونات التكافؤ

في جسيم مجاور، وهي تنشأ من الحركة العشوائية للإلكترونات في الجسيم؛ مما يؤدي إلى

تكوين أقطاب كهربائية لحظية على الجسيم.

أي هي نتيجة للتفاعلات ثنائية القطب بين الجزيئات. حيث إنّ التركيب الإلكتروني

المختلف للجزيئات تمنحهم سلوكاً ثنائياً القطب وهو قد يؤدي إلى عوامل الجذب. تعمل قوة

(Van der Waals) في البيئات الغازية والسائلة، على الرغم من انخفاضها انخفاضاً كبيراً

في البيئات السائلة. قام هامكر بحساب قوة التفاعل بين كرة وجسم شبه لانهائي، من خلال

تلخيص جميع التفاعلات الجزيئية الفردية الممكنة، على النحو التالي:

$$F_{van} = \frac{A_H * R}{12d^2} \quad (3)$$

d هي المسافة الفاصلة بين الجسمين [m]

R نصف قطر الجسمين [m].

A_H هو معامل Hamaker الذي يمثل خاصية مادية متعلقة بالخواص الجزيئية للجسيم

ذي نصف قطر R [μ].

F_{van} قوة فاندرفال [N].

بمجرد ملامسة الجسيمات؛ أي انخفاض d، تزداد جاذبية van der Waals بشكل

كبير بسبب الزيادة في منطقة الاتصال. يتعزز هذا الموقف عندما يحدث التشوه اللدن.

2-1-2 الجسور السائلة (liquid bridge):

في النظم الرطبة (ذات الرطوبة النسبية < 60%)، قد يحدث تكاثف شعري للسائل في

الفجوة بين الجسيمات في اتصال وثيق؛ مما يؤدي إلى جاذبية. يتم تحقيق أقصى جاذبية

لجزيئين كرويين أمتسين إذا كان السائل يغطي سطح الجسيمات بالكامل. في هذه الحالة،

يمكن حساب قوة جذب الجسر السائل F_{LB} على النحو الآتي:

$$F_{LB} = 2\pi\gamma R \quad (4)$$

γ هو التوتر السطحي للسائل [N/m]

R هو نصف قطر الجسيمين [m]

F_{LB} قوة جذب السائل [N]

بما أن الجسر السائل لا يمكن أن يحدث إلا في البيئات الرطبة؛ وبالتالي فهو ليس

ظاهرة شائعة [4].

2-1-3 الإلكتروستاتيكا (علم الكهرباء الساكنة):

يمكن أن تتشكل القوى الإلكتروستاتيكية نتيجة لشحن كهربائي أو تشكيل فرق كمون

محتمل بين الجسيمات. في الحالة الأخيرة ، تجذب الجسيمات المشحونة جسيمات مجاورة

غير مشحونة بسبب شحن جسمها ويمكن تقييم قوة الجذب بالمعادلة الكلاسيكية لقانون

Coulomb

قانون قوة كولوم: والذي ينص على أن: "قوة التجاذب أو التنافر بين شحنتين في

الفراغ تتناسب تناسباً طردياً مع القيمة المطلقة لحاصل ضرب شحنتيهما وعكسياً مع مربع

المسافة بينهما."

$$\vec{F}_{12} = K_e \frac{q_1 * q_2}{r_{12}^2} \quad (5)$$

$\vec{F}_{12}$ هي القوة المتبادلة بين الشحنتين [N] .

q_1 قيمة الشحنة الأولى واحدتها كولوم [C].

q_2 قيمة الشحنة الثانية واحدتها كولوم [C].

r_{12}^2 مربع المسافة بين مركزي الشحنتين [m²].

K_e هو ثابت كولوم وواحدته [Nm²/C²].

تجدر الإشارة إلى أنه في البيئات الرطبة، يتم تقليل جاذبية Coulomb إلى الصفر

نظراً لحقيقة أن أسطح الجسيمات مغطاة بالسائل، والذي في الغالب عبارة عن موصل يؤدي

إلى تسرب الشحنة وتفريغها. يمكن أيضاً دمج قوى عدم الاتصال الناتجة عن القوى

الكهروستاتيكية في عمليات محاكاة DEM، على الرغم من أنها ليست ظاهرة شائعة جداً نظراً

لحقيقة أن القوى الكهروستاتيكية مهمة في البيئات الجافة مع وجود مجال كهربائي أو جزيئات

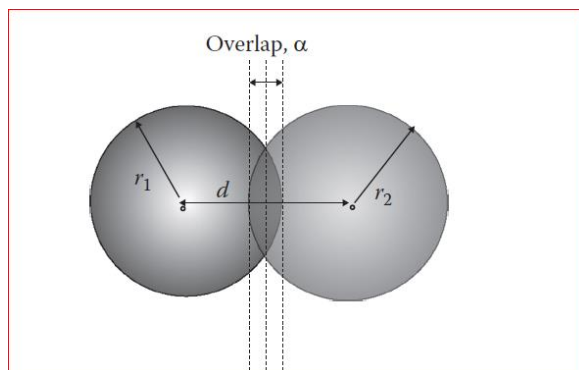
لها وظائف عمل مختلفة [4].

2-2 قوى الاتصال في DEM:

من أجل النظر في تفاعلات الجسيمات في الحسابات، يتم نمذجة القوى الناتجة عن تصادم

الجسيمات والاتصالات. هناك عدد من نماذج القوة التي تسمح في الغالب للجزيئات بتشوهها. على غرار

التشوه على أنها تداخل بين الجزيئات (الشكل 18).



الشكل 18 رسم توضيحي للتداخل الظاهري بين العناصر في DEM.

في الحالة العامة لتجميع العديد من الجسيمات، يتم تطبيق نموذج قوة التلامس عند كل اتصال،

ويتم تحديد الحجم الموجه لقوى التلامس هذه للحصول على قوة التلامس الناتجة التي تعمل على تلك

الجسيمات. في التصادمات المرنة، يتم تبديد جزء من الطاقة الناتجة ولن يتم استعادتها، على سبيل المثال:

على شكل موجات مرنة. من أجل حساب تبديد الطاقة هذا في عمليات محاكاة DEM، تتم إضافة قوة

امتصاص التلامس في الاتجاه المعاكس للحركة النسبية للجسمين المتصلين في معادلات الحركات [4].

3- نماذج قوى الاتصال:

كان هناك عمل مكثف في المراجع العلميّة من أجل تطوير نماذج دقيقة وفعّالة من الناحية

الحسابية؛ استنادًا إلى نظريات ميكانيك الاتصال المستخدمة في عمليات محاكاة DEM. في الغالب تم

تطوير هذه النماذج للاتصالات الكروية على أساس نظرية هيرتز.

حيث يتم نمذجة تشوه الجسيمات خلال الاصطدامات كتداخل؛ لذا تتعلق نماذج الاتصال بكمية

التداخلات (المماسيّة والناظرية) بين جسمين لتحديد حجم القوى حيث يتم استخدام خصائص المواد

والتفاعلات بينها (مثل معامل القص، والارتداد، ومعاملات الاحتكاك) التي يحددها المستخدم في

الحسابات. هناك العديد من النماذج القادرة على نمذجة التصادمات المرنة أو البلاستيكية للمواد المتماسكة

وغير المتماسكة[3].

4- نماذج لسلوك مواد مختلفة:

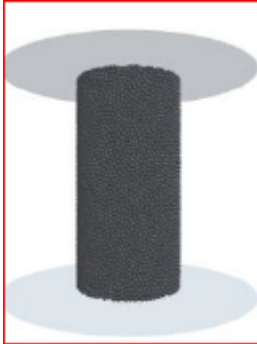


• **مواد حبيبية جافة:** هذا النوع من المواد يمكن نمذجته بواسطة dem

بنماذج مختلفة عددية أو لا عددية، والنماذج الأكثر شيوعاً هي Linear

Spring (نموذج النابض الخطي) أو Hertz–Mindlin (منديلين هيرتز)(بدون

انزلاق) ، وهو نموذج الاتصال الافتراضي في EDEM.



• **الترابط:** يمكن ربط الجسيمات في DEM معاً لمقاومة الحركة المماسية

والناظرية بحد أقصى للقيمة التي يحددها المستخدم والتي تنهار عندها قوى

الترابط. هذا النموذج مفيد بشكل خاص في نمذجة الهياكل الخرسانية

والصخرية.



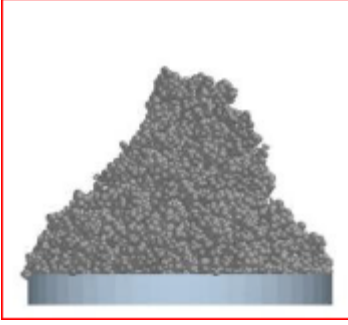
• **الإلكتروستاتيك (علم السكون للإلكترونات):** يمكن أن تصمم التفاعلات

الإلكتروستاتيكية طويلة الأمد على DEM حيث تنقل الجزيئات الشحنات؛

وبالتالي ينتج عنها قوى متبادلة بين الشحنتين (تجاذب أو تنافر) بالاعتماد على

قانون كولوم .يمكن محاكاة تطبيقات مثل سلوك طابعة الليزر باستخدام هذا

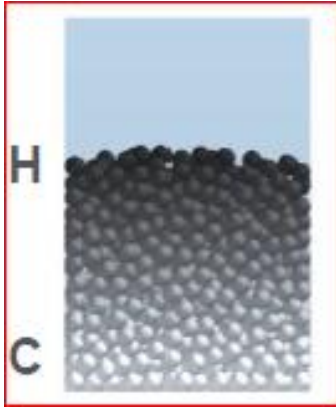
النموذج.



التماسك: يمكن لنماذج التماسك الموجودة في DEM محاكاة تأثير قوى

Van der Waals داخل مناطق الاتصال والسماح للمستخدم بنمذجة

الأنظمة الملصقة بقوة، مثل المساحيق الجافة أو المواد الرطبة.



• **نقل الحرارة:** بالنسبة لأنظمة الجسيمات الكثيفة، تكون الاتصالات بين

الجسيمات كبيرة، ويمكن أن يكون التوصيل الحراري ذا أهمية كبيرة.

تسمح عمليات محاكاة DEM بنمذجة نقل الحرارة بين الجسيمات، وتؤمن

نظرة ثاقبة على مجموعة متنوعة من التطبيقات التي تتراوح بين

المفاعلات متعددة الطور إلى الأفران ومحطات التحميص بالكلس (المكلسات) [3].

• **نماذج اتصال إضافية:**

للنظر في خصائص النظم المختلفة:

• **نموذج القيود أو الروابط:** من ميزات الاتصال القوي حيث إن الروابط بين الجسيمات قابلة

للكسر وهو ملحق بقوانين هيرتز ميندلين.

• **النموذج اللين:** وهو إضافة لنموذج الروابط وهو للنظر في الكسور الهشة.

• **النموذج الكهروستاتيكي:** التأثير في الجزيئات في المناطق المحيطة من دون اتصال مباشر.

• **نموذج برجر:** مزيج من ماكسويل وكلفن للتحقيق في عمليات الزحف [2].

5- كشف الاتصال:

بالنسبة للجزيئات الكروية، يتم الكشف عن التلامس إذا أصبحت المسافة بين اثنين من الكرات في النظام أقل من جمع نصف قطريها. لذلك، يتضمن كشف التلامس في عمليات محاكاة DEM فحص المسافة بين جميع الجزيئات في النظام. هذه العملية يمكن أن تكون واسعة من الناحية الحسابية عندما يتم محاكاة عدد كبير من الجزيئات. في عمليات محاكاة DEM، يتم عادةً تقدير مجال الحساب في خلايا ثلاثية الأبعاد، والتي يشار إليها أحيانًا باسم "شبكات".

تساعد الشبكات على إنشاء خوارزميات اكتشاف الاتصال والتي يتم تطبيقها على نطاق أصغر؛ مما يقلل من الوقت الحسابي. كما أنها تعزز كفاءة الحسابات الموازية حيث يمكن تمرير عدد من هذه الشبكات إلى المعالجات كلها.

لا يؤثر حجم الشبكة في دقة الحساب؛ ومع ذلك، فإنه يحدد سرعة المحاكاة. تؤدي أحجام الشبكات الصغيرة جدًا إلى وجود عدد كبير من الشبكات التي قد تقلل من كفاءة اكتشاف التلامس، في حين تؤدي أحجام الشبكات الكبيرة جدًا إلى عدد كبير جدًا من الجزيئات داخل كل شبكة؛ مما يقلل من سرعة المحاكاة مرة أخرى. حيث يجب اختيار حجم الشبكة بناءً على توزيع حجم الجسيمات المتولدة، وديناميك العملية التي يتم محاكاتها، تم العثور على حجم الشبكة من ثلاث إلى خمس مرات أصغر دائرة نصف قطرها الجسيمات ليكون النطاق الأمثل لمعظم عمليات المحاكاة.

أحد قيود DEM هو عدد الجسيمات التي يمكن محاكاتها حيث إنَّ زيادة عدد الجسيمات يتطلب لإجراء كشف التلامس إجراء حلقة من خلال مجموعة أكبر من الجزيئات التي تؤدي إلى عمليات محاكاة بطيئة للغاية. العلاقة بين وقت المحاكاة وعدد الجسيمات عادةً ليست خطية. فضلاً عن ذلك، يتطلب عدد أكبر من الجزيئات مزيداً من احتياجات الأجهزة من حيث الذاكرة (لتخزين معلومات الجسيمات الفردية) وفيما يتعلق بالقرص الصلب، عند اتصال كرتين، ستخفُض القوة العادية بينهما فوراً إلى قيمة معينة بسبب تخزين ملفات المحاكاة. مع التطورات الحديثة في تكنولوجيا الكمبيوتر، وخاصة الحسابات المتوازية التي تستخدم معالجات متعددة النوى، فإن هذا القيد أخذ في التحسن [5].

6- منهجي النمذجة للعناصر المتقطعة:

هناك طريقتان رئيستان للمحاكاة المتقطعة: منهج الكرات الصلبة ومنهج الكرات اللينة.

✓ **منهج الكرات الصلبة:** يُفترض أن قوى التفاعل تكون دافعة ولا تتبادل الجسيمات سوى

كمية الحركة من خلال التصادمات. أما القوى بين الجسيمات فلا يتم النظر فيها صراحة.

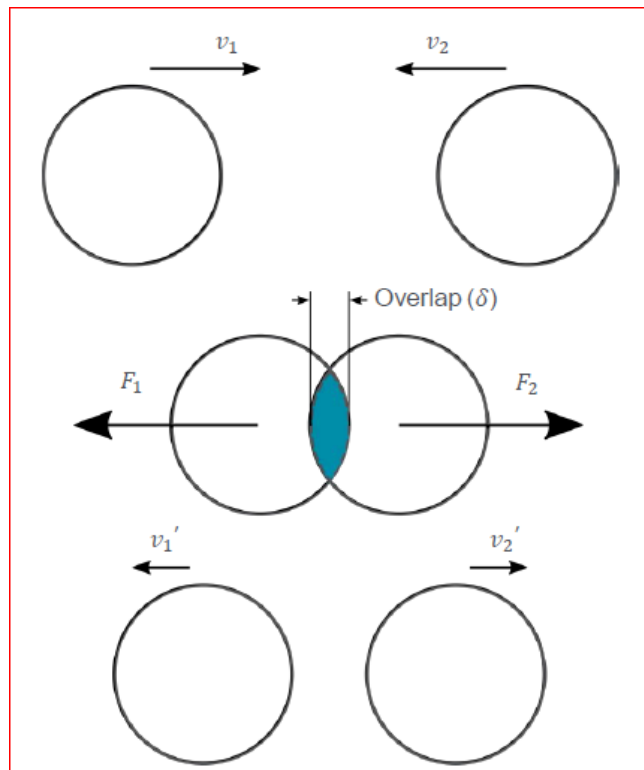
✓ **منهج الكرات اللينة:** هناك طريقة أخرى تتمثل في نهج المجال اللين حيث يفترض

أيضاً أن تكون الجزيئات صلبة، ولكن يُسمح للتداخل الصغير بتمثيل التشوهات في أثناء

الاتصال، وهي الطريقة الأكثر شيوعاً ودقة. حيث يتم استخدامها في معظم حزم DEM،

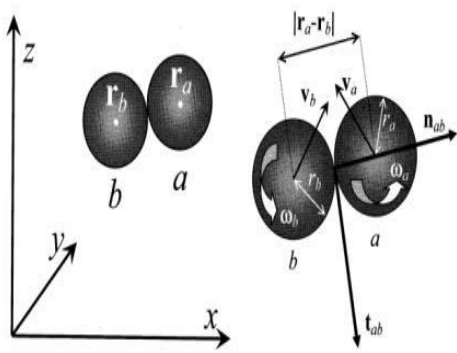
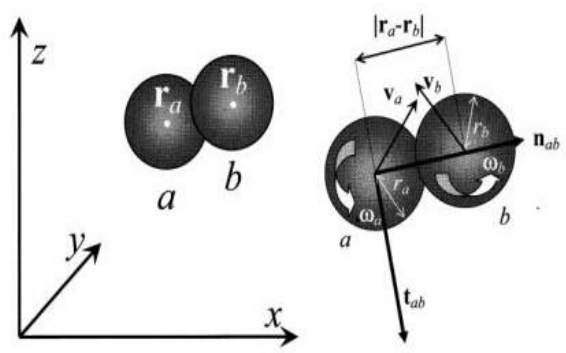
بما في ذلك EDEM. حيث يبين الشكل (19) كيفية حدوث التداخل الصغير في نهج

الكرات اللينة، حيث يستخدم التداخل لحساب أحجام القوى المؤثرة في الجسيمات [3].



الشكل 19 منهج الكرات اللينة.

جدول 4 مقارنة بين منهجي المجال الصلب والمجال اللين [2].

منهج الكرات الصلبة	منهج الكرات اللينة
القوى المتبادلة معتمدة على كمية الحركة	تعتمد على قوى التماس
	
$I_{ab} = I_n n_{ab} + I_t t_{ab}$	$F_{ccontact,a} = \sum F_{ab,n} + F_{ab,t}$
عند ملاسة الجسيمات، لا يُسمح بالتداخل في منطقة التلامس إنما يحدث تصادم فقط.	عند ملاسة الجسيمات، يُسمح بالتداخل في منطقة التلامس.
يعتمد اختيار النهج على سرعة الجسيمات حيث يستخدم في السرعات العالية.	يعتمد اختيار النهج على سرعة الجسيمات. حيث يستخدم في السرعات المنخفضة.
يفشل نهج الكرات الصلبة في التنبؤ بسرعات الجسيمات المنخفضة وأزمنة الاتصال الطويلة.	عند أزمنة التلامس المنخفضة (أي سرعة الجسيمات عالية نسبياً) تزداد دقة الخطوة الزمنية اللازمة لمعالجة ملاسة الجسيمات، في المقابل فإن ذلك يحتاج إلى المزيد من الخطوات الزمنية؛ وبالتالي وقت حساب أطول.

7- أهمية تحديد الخطوة الزمنية:

يعد اختيار الخطوة الزمنية Δt ذا أهمية حاسمة في عمليات محاكاة DEM، حيث يجب اختيارها صغيرةً بدرجة كافيةٍ لسببين رئيسين: أولاً منع التداخل المفرط الذي ينتج عنه قوى عالية بشكل غير واقعي، وثانياً تجنب تأثيرات موجات الاضطراب (أمواج رايلي).

يتراوح نطاق الخطوة الزمنية المعتادة لـ DEM في نطاق 10^{-4} حتى 10^{-6} وهو أصغر بمقدار 10 أو

100 مرة مما يظهر في ديناميكيات الموائع الحسابية (CFD) Computational fluid

[3](dynamics)

8- موجات رايلي السطحي:

تتأثر حركة الجسيمات داخل التدفق الحبيبي ليس فقط بالقوى وعزم الدوران الناشئين عن التلامس مع الجسيمات المجاورة لها مباشرةً، ولكن أيضاً من خلال انتشار الاضطرابات من الجسيمات البعيدة. باختيار خطوة زمنية صغيرة بما يكفي في DEM، تمنع موجات الاضطراب من كل جسيم من الانتشار أكثر من جيرانها المجاورة لها.

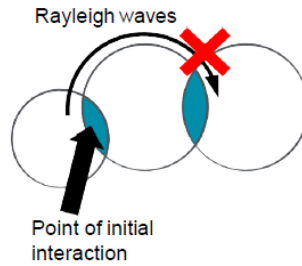
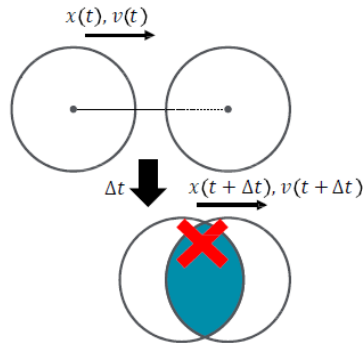
يتم تقريب الخطوة الزمنية المناسبة (خطوة وقت رايلي) من سرعة انتشار موجة سطح رايلي. عادة

ما يتم اتخاذ جزء بسيط من هذه الخطوة الزمنية لضمان معدلات نقل قوة واقعية، ومنع عدم الاستقرار

العددي [3].

$$T_R = \frac{\pi R \left(\frac{\rho}{G} \right)^{1/2}}{0.163\nu + 0.8766} \quad (6)$$

T_R خطوة زمن رايلي [s].
 R قطر الجزيئات [m].
 ρ الكثافة [kg/m³].
 G معامل القص [N/m²].
 ν معامل بواسون للجزيئات (بلا واحدة).



الشكل 20 خطوة زمن رايلي.

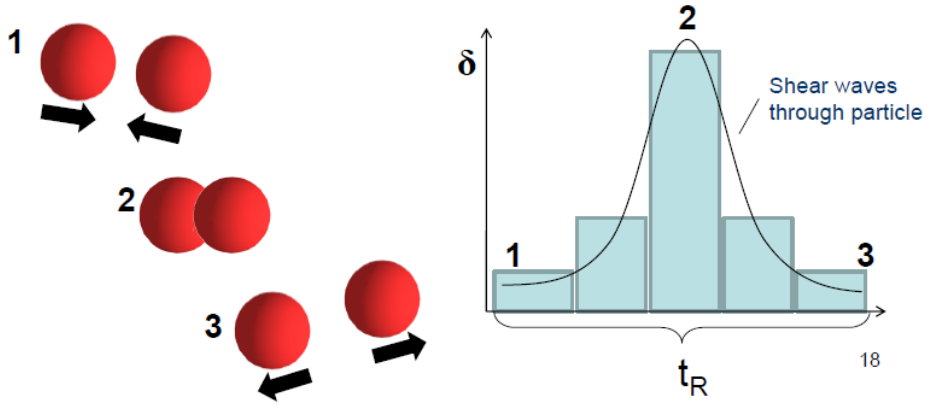
9- اختيار الخطوة الزمنية النمذجية:

هناك وصف عابر لتأثير الجسيمات، وتحديد الخطوة الزمنية النمذجية للحصول على دقة كافية

$$\text{وهو } t_{\text{sim}} < 0.25 t_R$$

t_{sim} زمن النمذجة.

t_R زمن رايلي .



الشكل 21 الخطوة الزمنية النموذجية.

في الممارسة العملية، يتم استخدام جزء من هذه القيمة القصوى لخطوة وقت التكامل. بالنسبة

للأنظمة الكثيفة ذات أرقام التنسيق العالية (متوسط عدد الجيران المباشرين حول جسيم في النظام عالٍ)،

أي 4 وما فوق، فقد ثبت أن الخطوة الزمنية النموذجية البالغة $0.2 t_R$ مناسبة. بالنسبة لأرقام التنسيق

المنخفضة، يكون $0.4 t_R$ أكثر ملاءمة.

نظرًا لأن الخطوة الزمنية تختلف باختلاف مواد الجسيمات، بالنسبة لتجميع يتكون من جسيمات

أنواع مختلفة من المواد، يجب أن تكون الخطوة الزمنية الحرجة هي الأصغر بين تلك المحددة لخصائص

المواد المختلفة. على سبيل المثال، فإن الخطوة الزمنية لرايلي لخرز الزجاج الكروي من 1 ميكرون حوالي

2 نانو ثانية. هذا يعني أنه من أجل محاكاة الوقت الحقيقي لنظام واحد يتكون من حبيبات زجاجية واحدة

ميكرون، يجب تنفيذ حلقات حساب DEM مليار مرة. هذا يسلط الضوء على واحدة من قيود محاكاة

DEM. لمحاكاة نظام لمدة زمنية محددة، ستتأثر سرعة الحساب بدرجة كبيرة بأصغر حجم جسيم في

النظام [4].

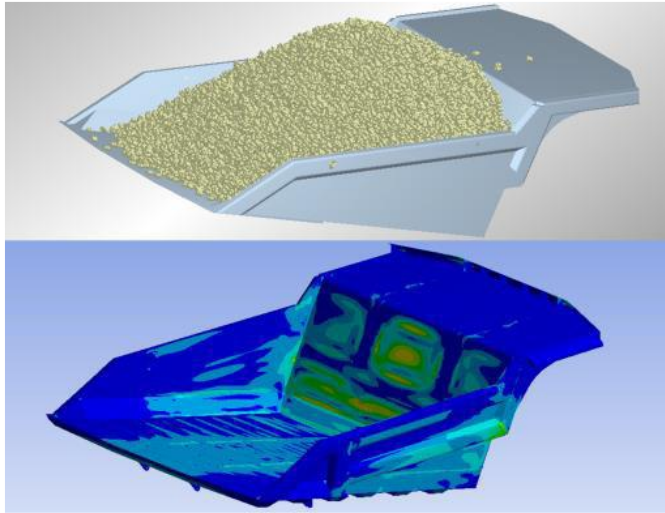
10- اقتران EDEM والمحاكاة المشتركة:

10-1 اقتران EDEM-FEA

يقوم برنامج edem بنمذجة القوى الواقعية وتوزيعات ضغوط المواد التي تعمل على المعدّات.

ويمكن بعد ذلك استخدام هذه الحمولات كمدخلات في التحليل الهيكلي أو الإجهادات في أي برنامج لتحليل

العناصر المنتهية (FEA) (Finite Element Analysis)[3].



الشكل 22 اقتران DEM-FEA لتحليل أحمال جرّافة شاحنة التفريغ.

10-2 اقتران DEM-MBD

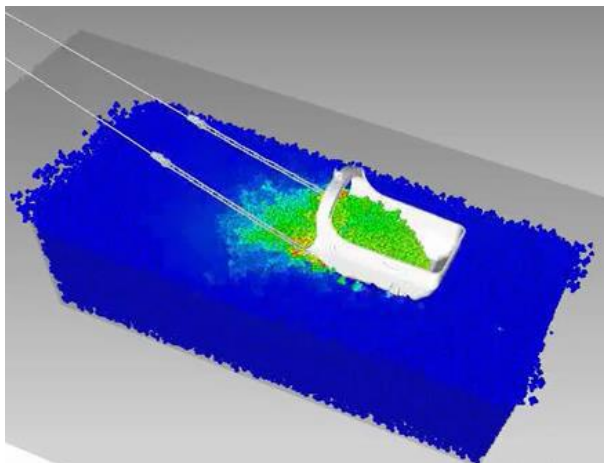
يتيح اقتران DEM مع حزم الديناميكيات المتعددة للأجسام (MBD) (multi-body

dynamics) للمستخدمين إجراء عمليات محاكاة من خلال التحكم البرمجي لحركة الشكل الهندسي

وطبيعته مما يتيح تنفيذ حركات الجسم المعقدة والصلبة.

يمكن استرجاع قوى bulk material التي تعمل على سطوح المعدات المحسوبة بواسطة برنامج

DEM بواسطة الكود المقترن لإرجاع حركات المعدات الواقعية [3].



الشكل 23 محاكاة DEM-MBD لدلو السحب.

10-3 اقتران DEM-CFD

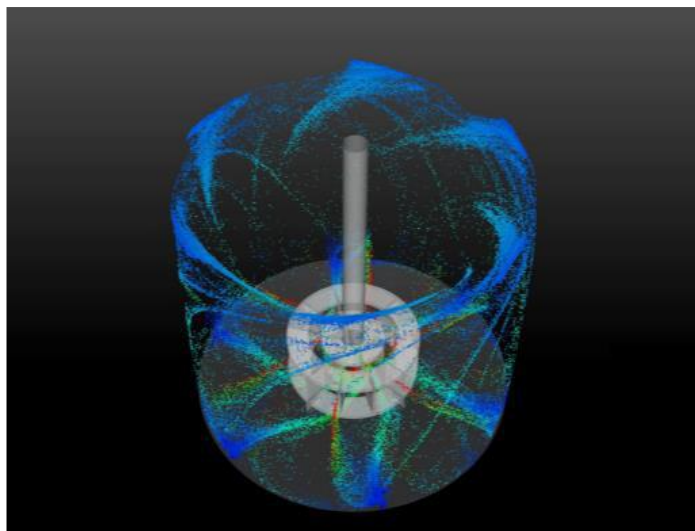
يمكن أيضًا استخدام DEM بالاقتران مع ديناميكيات الموائع الحسابية (CFD)

(computational fluid dynamics) من أجل التحقق من سلوك الجسيمات في الطور السائل.

يتم حلّ الحركة الصلبة والسوائل من خلال معادلات نيوتن للحركة للجزيئات المتقطعة ومعادلات

نافير ستوكس لسائل الاستمرارية. يعتمد الاقتران على التبادل المستمر للمعلومات بين برامج DEM

وCFD. يمكن استخدام نماذج السحب المختلفة للتفاعل بين الجسيمات والسوائل [3] (الشكل 24).



الشكل 24 نموذج DEM-CFD لديناميكيات تعويم الجسيمات

11- تطبيق القوى على الجزيئات:

يتم تطبيق قوى السوائل على الجزيئات، كما في الشكل (25)، ويتم حساب قوة سحب الجزيئات

في السائل وفقاً للعلاقات الرياضية المعتمدة على القانون الأساسي في الحركة الانسحابية [2].

كما في المعادلة 6

$$m \frac{du}{dt} = F_e - F_b - F_D \quad (7)$$

m كتلة الجسيم [kg].

u السرعة النسبية للجسيم داخل السائل [m/s].

F_e قوة خارجية مطبقة (External force) [N].

F_b قوة الطفو (buoyant force) [N].

F_D قوة السحب (Drag force) [N].

$$F_e = ma \quad (8)$$

$$F_b = \frac{m\rho a}{\rho_p} \quad (9)$$

$$F_D = \frac{C_D * u^2 * \rho * A_P}{2} \quad (10)$$

بالتعويض واختصار m في المعادلة (7) نجد أن:

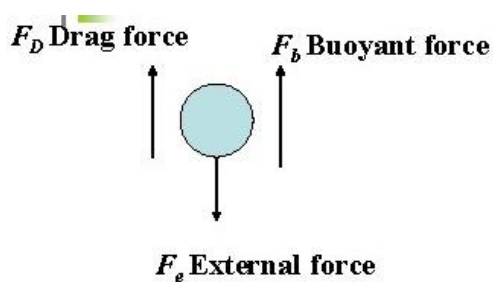
$$\frac{du}{dt} = a - \frac{\rho a}{\rho_p} - \frac{C_D * u^2 * \rho * A_P}{2m} \quad 11$$

ملاحظة: قوة السحب تزداد بازدياد مربع السرعة النسبية للحركة في حالة ثبات جميع

البارامترات الأخرى.

وتعطي السرعة النسبية بالعلاقة:

$$u = v_f - v_p |v_f - v_p| \quad 12$$



الشكل 25 تطبيق القوى على الجزيئات.

a تسارع الجسيم (particle acceleration) $[m/s^2]$.

ρ_p كثافة الجسيم (particle density) $[kg/m^3]$.

ρ_f كثافة السائل (fluid density) $[kg/m^3]$.

C_D معامل السحب: معامل السحب في ديناميك الموائع (Drag coefficient) يستخدم في

حساب مقاومة مائع لحركة جسم فيه، ويعتمد على شكل الجسم، ويأخذ في الحسبان

الاحتكاك السطحي والسحب الهيكلي (بلا واحدة).

A_p المساحة المسقطية (projected Area) تعتمد بناءً على مسقط مستوي عمودي على اتجاه

الحركة للجسيم. فبالنسبة لجسيم كروي مثلاً تكون المساحة المسقطية دائماً هي مقطع

الكرة $[m^2]$.

الفصل الثالث

عملية تلبيس المضغوطات الدوائيّة

يحتوي هذا الفصل على شرح لعملية تلبيس المضغوطات الدوائية والبارامترات الحرجة في

العملية.

1- مقدمة:

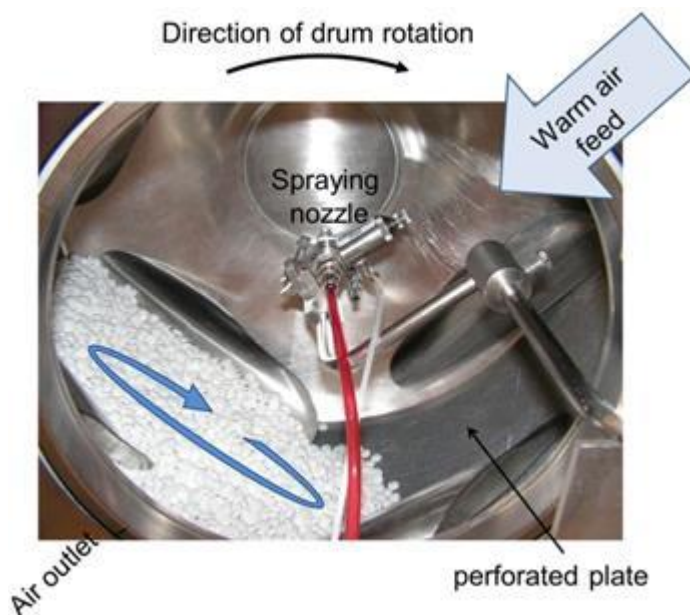
تعدُّ عملية تلبيس المضغوطات عمليةً شائعةً ومهمّةً في الصناعة الصيدلانية، والهدف منها هو

إحاطة المضغوطة بطبقة صلبة ورقيفة واحدة أو أكثر. حيث تتم عملية التلبيس عن طريق تحريك

المضغوطات باستمرار في حلّة دوّارة وبخّها بسائل تلبيس يحتوي على محاليل ومذيبات تشكّل الطبقة

الرقيفة (film). كما يعزّز الهواء الساخن الذي يتدفق عبر النظام من تبخر المذيب، كما يبين

الشكل (26) عملية تلبيس المضغوطات.

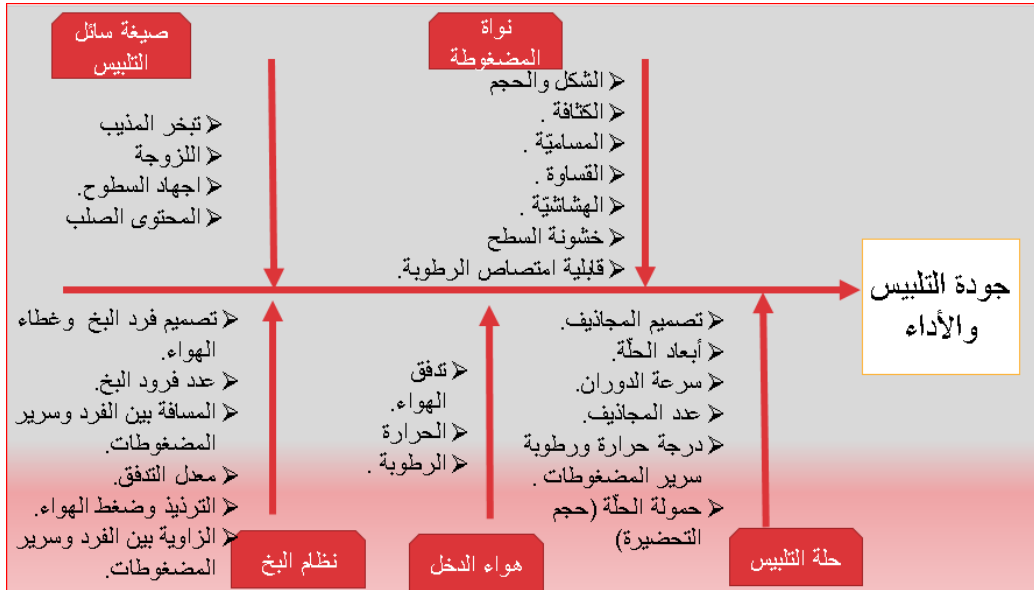


الشكل 26 عملية تلبيس المضغوطات.

2- مخطط البارامترات المتغيرة والمؤثرة في عملية التلبيس:

الشكل (27) يبين البارامترات المؤثرة في جودة عملية التلبيس للحصول على عملية تلبيس

ناجحة وذات مواصفات جيدة [6].



الشكل 27 بارامترات الجودة لعملية التلبيس

ولطبقة التلبيس وظائف مختلفة، مثل الحماية من التأثيرات البيئية كالضوء والحرارة والرطوبة،

وإخفاء الطعم، والتحكم في تحرر المواد الفعالة، ويجب أن تقي طبقة التلبيس بمعايير الجودة الصارمة،

بما في ذلك توحيد سماكة طبقة التلبيس.

هناك حالة خاصة من حالات التلبيس وهي التلبيس النشط أو الفعال، حيث يحتوي فضلاً عن

السواغات على مكّون دوائي نشيط (API)

(Active Pharmaceutical Ingredient) عادةً ما يتم تحديد تجانس التلبيس بواسطة

معامل الاختلاف (cov_inter) (coefficient of variation) والذي يطلق عليه أيضًا الانحراف

المعياري النسبي (RSD).

فيما يتعلق بالتلبيس للمادة الفعّالة، يُعدُّ ضمان توحيد محتويات مادة التلبيس مَهْمَةً صعبة؛ وبالتالي

يُعدُّ تجانس طبقة التلبيس داخل المضغوطة وبين المضغوطات هي سمات الجودة الحرجة

(CQAs) (Critical Quality Attributes) [7]

ملاحظة: إنّ التوحيد العالي سيعطي قيمة منخفضة لـ (cov_inter) وهنا، يمكن تحديد فئتين:

التوحيد داخل وبين المضغوطات.

حيث (cov_intra) هو التوحيد في كتلة طبقة التلبيس على كل كامل سطح المضغوطة،

أما (cov_inter) هو التوحيد في كتلة طبقة التلبيس فيما بين المضغوطات المختلفة. في أثناء

عملية التلبيس النشط، يكون هذا الأخير أكثر أهميّة من السابق: يجب أن تجتاز المضغوطات اختبار

توحيد وحدات الجرعات؛ وفقًا للوائح. بما أنّ هذا ينطبق على كمية API ، فإنه يتعلق مباشرة بكمية كتلة

التلبيس. تعتمد قيمة العتبة التنظيمية الفعلية للتوحيد على عدد من العوامل. لأغراض هذا العمل،

(cov_inter) يجب ألا يتجاوز 6.25%) (أو 0.0625) حسب دستور الأدوية 2011 [8].

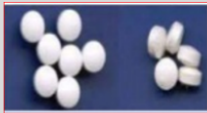
في حين أنَّ عملية التلييس هي عملية بسيطة نسبياً إلا أنَّ فهمها بالتفصيل هو أمر ضروري؛

لأن عملية التلييس في الصناعات الدوائية تتطلب دوماً الجودة العالية للمنتج، كما يمكن رفض دفعة

إنتاجية كاملة إذا لم يتم الاستيفاء بأحد أو بكلا المعيارين السابقين للقيم المطلوبة.

3- استكشاف أخطاء عملية التلييس والحلول المقترحة:

جدول 5 مشاكل عملية التلييس والأسباب والحلول [9]

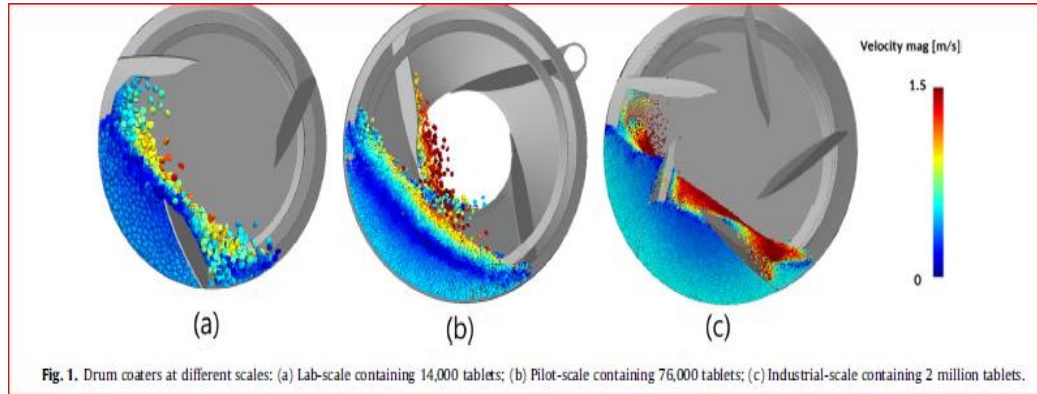
الحلول	الأسباب	مشاكل عملية التلييس
• التصميم الأمثل لمعدل التدفق. • زيادة سرعة دوران الحلة. • زيادة درجة حرارة سرير المضغوطات.	• معدل تدفق عالٍ لسائل التلييس. • سرعة منخفضة لحلة التلييس. • حرارة منخفضة لسرير المضغوطات.	الالتصاق 
• تخفيض معدل التجفيف. • استخدام مواد صلبة في سائل التلييس ذات لزوجة قليلة.	• عملية تجفيف سريعة جداً. • لزوجة عالية لسائل التلييس.	التفتت 
• تغيير شكل المضغوطات. • زيادة معدل تدفق هواء الدخول.	• شكل المضغوطات مسطحة جداً أو بشكل كيسول. • تدفق هواء دخل غير كافٍ.	التواءمة 
الحلول	الأسباب	مشاكل عملية التلييس
• تخفيض المواد المفتتة في الصيغة. • تغيير الصيغة.	• رطوبة عالية في المضغوطات. • قساوة سطح المضغوطات قليلة أو هشاشية النواة منخفضة.	الخشونة 
• تحسين تصميم الشعار. • زيادة المواد الملتيية. • تقليل المسافة.	• تصميم ضعيف للشعار في النواة. • قلة المواد الملتيية في الصيغة. • مسافة كبيرة بين فروع البخ والمضغوطات.	تعينة الشعار 
• زيادة rpm عدد دورات حلة التلييس أو زيادة عدد المجانييف. • استخدام مواد مثبته للون في الصيغة.	• مزج غير مناسب للمضغوطات في حلة التلييس. • قلة المواد الملّسعة في الصيغة.	اختلاف الألوان 

4- توزيع السرعة في منطقة البخ:

يعدّ توزيع السرعة في منطقة البخ مهماً لأداء عملية تلبيس المضغوطات، حيث يؤدي التوزيع المنتظم للسرعة في منطقة البخ إلى حصول المضغوطات على نفس زمن الإقامة في منطقة البخ وبالتالي جودة تلبيس جيدة بسبب التوزيع المتجانس لكتلة التلبيس خلال كل تمريرة. تؤدي السرعات العالية إلى زمن أقصر للزيارة الواحدة للمضغوطة داخل منطقة البخ، وبالتالي خلط أفضل في منطقة البخ ولكن مع زيادة احتمالية عيوب المضغوطة بسبب التآكل.

في المقابل، تزيد السرعات المنخفضة للمضغوطات من خطر التبلل المفرط للمضغوطة وهو

السبب الرئيس لتماسك المضغوطات معاً والعيوب الأخرى [7].



الشكل 28 توزيع السرعة في منطقة البخ.

5- زمن فترة البخ:

يتم تحديد زمن مدة البخ على أنه الوقت الذي تقضيه المضغوطات في مناطق البخ، خلال عملية

تلبيس واحدة، ويتأثر زمن فترة البخ بسرعة المضغوطات. كما أنه يؤثر في نتيجة العملية، حيث يؤدي

التوزيع المحدود في زمن فترة البخ أيضاً إلى عملية رش موحدة لأن كل مضغوة تتلقى الكمية نفسها من كتلة التلبيس لكل منطقة رش [7].

6- زمن دورة السرير

زمن دورة السرير هو الوقت الذي تقضيه المضغوة خارج منطقة البخ وبين عمليتي بخ متتاليتين، يمكن تفسير تناقص فرصة مضغوة لإعادة دخول منطقة البخ بعد الدورة غير المنفصلة بالطريقة التي تتحرك بها المضغوطات داخل الحلة. عندما يمر قرص عبر منطقة البخ، فإن احتمال إعادة الدخول مرتفع. عندما تخسر المضغوة فرصة الدخول لمنطقة البخ، فإن احتمال إعادة الدخول تنخفض. إن كل مضغوة في أثناء عملية البخ تزور منطقة البخ مرات عديدة وفي كل مرة يتم تطبيق طبقة جزئية من التلبيس وخلال عدد كافٍ من الزيارات تتم تغطية المضغوة كلياً بطبقة تلبسية ذات سماكة معينة.

تعتمد كتلة التلبيس المطبقة على قرص فردي في الغالب على الوقت الذي تبقى فيه المضغوة

في مناطق البخ [7].

الفصل الرابع

النتائج والمحاكاة العملية

في هذا الفصل سوف نقوم بإجراء محاكاة عملية تلبيس المضغوطات الدوائية باستخدام برنامج

EDEM 2021 ومقارنة نتائج النمذجة بالنتائج التجريبية في مخبر البحث والتطوير للتأكد من صحة

النتائج التي توصلنا لها نتيجة النمذجة ومدى دقتها ومقارنتها للواقع.

أولاً: الأتمتة والنمذجة:

أدخل التطور التقني الكبير في هندسة الحاسوب وعلومه في الأعوام الأخيرة مفاهيم جديدة في الأتمتة، منها تخطيط الأتمتة قبل إنجازها إذ أصبحت أتمتة أي عملية أو منظومة تمر بمرحلتين أساسيتين هما النمذجة modeling والمحاكاة Simulation قبل البدء بتنفيذ تلك المنظومة . والنمذجة هي المرحلة التي يتم فيها بناء نموذج رياضي للمنظومة المطلوب أتمتها يصف سلوكها الديناميكي وصفاً كاملاً. ويتم إنجاز ذلك باستخدام عدة طرائق رياضية تعتمد على مبدأ حفظ مصونية الطاقة وعلى بنيتها الديناميكية وطريقة ترابط العناصر المكونة لها. أما المحاكاة فتتضمن بناء منظومة مصغرة، لها مواصفات المنظومة الأصلية نفسها المطلوب أتمتها وتحاكيها في السلوك . ويمكن إنجاز ذلك ببناء نموذج إلكتروني مخبري باستخدام العناصر الإلكترونية الفعالة المتوافرة أو باستخدام الحاسوب وكتابة برنامج بإحدى لغات البرمجة المعتمدة، ثم تشغيل هذا النموذج بالشروط المحيطية نفسها المطلوب تشغيل المنظومة الأصلية فيها .

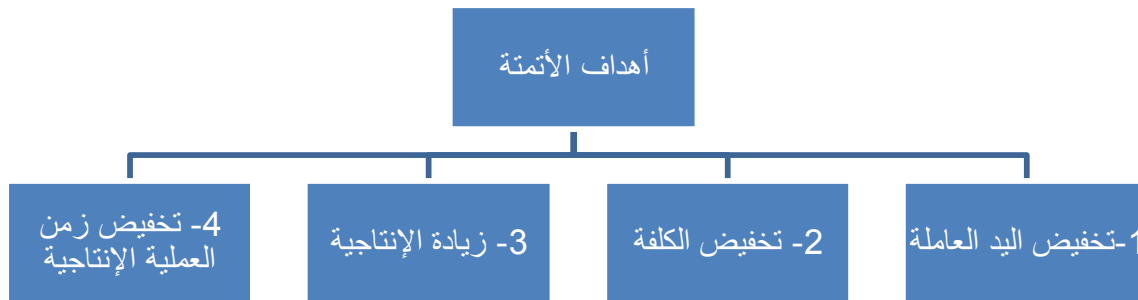
والفائدة من إجراء النمذجة والمحاكاة قبل إنجاز الأتمتة هي اختصار مراحل الإنجاز ، والتثبت من صحة النتيجة النهائية لعمل المنظومة . ويمكن تصحيح أي خطأ وظيفي بضبط النموذج الرياضي المستعمل وتعديل البرنامج بلا أي كلفة إضافية، في حين إن كشف مثل هذه الأخطاء في مراحل إنجاز الأتمتة بلا استخدام هذه الطريقة يوجب تغيير بعض أجزاء المنظومة وهذا مكلف جداً في المنظومات المعقدة . من بين التطبيقات الحاسوبية المهمة في عملية نمذجة التطبيقات الصناعية الصيدلانية هو برنامج edem باستخدام برامج طريقة dem حيث يوفر التطبيق بيئة رائعة للتصاميم الهندسية مع إمكانية تغيير الأبعاد أو أية أخطاء قد توجد في التصميم بسهولة مع إمكانية إجراء نسخ عديدة على التصميم وسهولة حفظها وتكوين قاعدة بيانات Data Base خاصة بالنموذج المصمم تحتوي على كافة المعلومات الهندسية عنه ثم يتم إجراء النمذجة لمراقبة سلوك النموذج الذي تم بناءه ، وكما يمكن عن طريق عملية المحاكاة (Simulation) معرفة الكثير من الأخطاء ونقاط الضعف في التصميم قبل أن

يتم اعتمادها فعلياً وتطبيقها، كما يمكن إجراء عملية اختبار على الأجهزة المخبرية لاكتشاف المزيد من الأخطاء وبالتالي إعادة تصميم الجزء الذي يسبب الخلل. بعد خلو النموذج المصمم من العيوب يمكن حينئذٍ المباشرة بالإنتاج الفعلي [22].

المحاكاة (Simulation) هي عملية تقليد لأداة حقيقية أو عملية فيزيائية أو حيوية. تحاول المحاكاة أن تمثل و تقدم الصفات المميزة لسلوك نظام مجرد أو فيزيائي بوساطة سلوك نظام آخر يحاكي الأول. تستخدم كلمة (محاكاة) في عدة مجالات بما فيها النمذجة للجمل الطبيعية والأجهزة البشرية لمحاولة استكشاف تفاصيل هذه العملية. هناك محاكاة أيضاً في التقنية و هندسة الأمان safety engineering حيث يكون الهدف فحص بعض سيناريوهات العمل في العالم الحقيقي و اختبار أمن بعض العمليات أو حتى مدى جدواها العلمية و الاقتصادية. المحاكاة تهدف إلى دراسة و بناء نماذج و برمجيات لتقليد نظام حقيقي، قائم أو مزعم انشاءه، و ذلك بهدف دراسته، و تعرّف بأنها نموذج تشغيل حقيقي أو نظام مقترح لعملية بيئية، تستخدم فيها شبكات الاتصالات الحديثة للوصول إلى هذا العالم الافتراضي.

وباستخدام المحاكاة فإنه يمكن توفير الكثير من المال حيث يمكن رؤية مدى توافق المواصفات المطلوبة مع النموذج المبني وبالتالي يمكن التحقق أداء التجهيزات كل هذا قبل القيام ببنائها وتصنيعها في الواقع [23].

ضمن دراستنا فإن مفهوم النمذجة يحقق أهداف الأتمتة المطلوبة وهي :



وفقاً للمرجع [7] كان عدد التجارب لتلبيس المضغوطات المراد إجراؤها 63 تجربة حيث تمت دراسة تغيير كل من البارامترات التالية :

- 1- سرعة دوران حلة التلبيس عند القيم 8 و 9 و 10 دورة بالدقيقة.
- 2- حمولة حلة التلبيس عند القيم 230 و 240 و 250 و 260 و 290 كغ
- 3- عدد فروود البخ المستخدمة 8/6/4.

4- معدل التدفق لفرد البخ 240-160-360 غ / دقيقة .

وأدى ذلك إلى 63 حالة دراسة كما في الجدول المرفق وتم إجراء المحاكاة على برنامج edem لمدة 90 ثانية لكل حالة ومن ثم استقرأ قيمة cov_inter بعد انتهاء زمن العملية حسب الجدول 25 واختصار عدد التجارب الفعلية بسبب تكوين رؤية واضحة عن نتيجة كل تجربة من النمذجة.

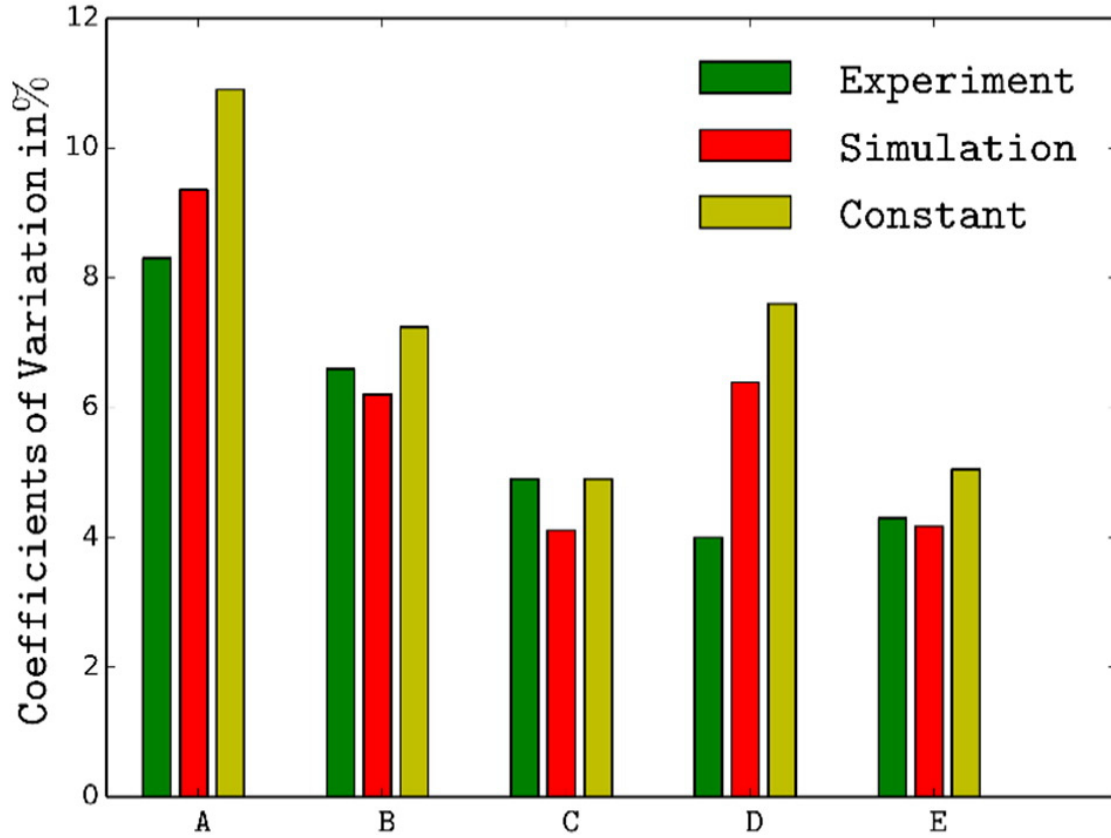
جدول 6 دراسة 63 حالة نمذجة لتلبيس المضغوطات عند بارامترات مختلفة

Case	Load in kg	Rotation rate in rpm	Number of nozzles	Spray rate in g/min	cv,inter after 90 s	cv,inter Final exponent 0.5	cv,inter Final fitted exponent
1	230	8	4	160	82.32%	5.62%	4.98%
2	230	8	4	240	100.82%	6.89%	6.10%
3	230	8	4	360	123.47%	8.43%	7.48%
4	230	8	6	160	67.07%	4.59%	3.79%
5	230	8	6	240	82.15%	5.63%	4.64%
6	230	8	6	360	100.61%	6.89%	5.68%
7	230	8	8	160	59.26%	4.20%	2.97%
8	230	8	8	240	72.58%	4.99%	3.63%
9	230	8	8	360	88.89%	6.11%	4.45%
10	230	10	4	160	73.74%	5.04%	4.37%
11	230	10	4	240	90.31%	6.17%	5.35%
12	230	10	4	360	110.61%	7.56%	6.55%
13	230	10	6	160	61.08%	4.20%	3.38%
14	230	10	6	240	74.81%	5.12%	4.13%
15	230	10	6	360	91.63%	6.28%	5.06%
16	230	10	8	160	54.70%	4.20%	2.76%
17	230	10	8	240	66.99%	4.61%	3.38%
18	230	10	8	360	82.05%	5.64%	4.14%
19	240	9	4	160	78.56%	5.37%	4.57%
20	240	9	4	240	96.22%	6.58%	5.60%
21	240	9	4	360	117.85%	8.06%	6.85%
22	240	9	6	160	64.57%	4.43%	3.45%
23	240	9	6	240	79.08%	5.43%	4.22%
24	240	9	6	360	96.85%	6.65%	5.17%

25	240	9	8	160	57.54%	4.20%	2.77%
26	240	9	8	240	70.47%	4.85%	3.39%
27	240	9	8	360	86.31%	5.94%	4.15%
28	250	9	4	160	79.49%	5.44%	4.59%
29	250	9	4	240	97.35%	6.66%	5.63%
30	250	9	4	360	119.23%	8.16%	6.89%
31	250	9	6	160	65.32%	4.48%	3.43%
32	250	9	6	240	80.00%	5.49%	4.20%
33	250	9	6	360	97.98%	6.73%	5.14%
34	250	9	8	160	58.01%	4.20%	2.70%
35	250	9	8	240	71.04%	4.90%	3.31%
36	250	9	8	360	87.01%	6.00%	4.05%
37	260	9	4	160	80.37%	5.50%	4.62%
38	260	9	4	240	98.43%	6.73%	5.66%
39	260	9	4	360	120.55%	8.25%	6.93%
40	260	9	6	160	66.12%	4.54%	3.50%
41	260	9	6	240	80.98%	5.56%	4.29%
42	260	9	6	360	99.18%	6.80%	5.25%
43	260	9	8	160	58.55%	4.20%	2.69%
44	260	9	8	240	71.71%	4.94%	3.30%
45	260	9	8	360	87.83%	6.05%	4.04%
46	290	8	4	160	88.81%	6.09%	4.82%
47	290	8	4	240	108.78%	7.45%	5.91%
48	290	8	4	360	133.22%	9.13%	7.23%
49	290	8	6	160	72.30%	4.98%	3.40%
50	290	8	6	240	88.55%	6.10%	4.17%
51	290	8	6	360	108.45%	7.47%	5.10%
52	290	8	8	160	63.59%	4.41%	2.43%
53	290	8	8	240	77.88%	5.40%	2.98%
54	290	8	8	360	95.38%	6.62%	3.65%
55	290	10	4	160	79.60%	5.43%	4.98%
56	290	10	4	240	97.49%	6.65%	6.10%
57	290	10	4	360	119.40%	8.14%	7.47%
58	290	10	6	160	65.55%	4.48%	3.89%
59	290	10	6	240	80.29%	5.48%	4.77%
60	290	10	6	360	98.33%	6.72%	5.84%
61	290	10	8	160	58.31%	4.20%	3.21%

62	290	10	8	240	71.42%	4.89%	3.93%
63	290	10	8	360	87.47%	5.99%	5.99%

تم إجراء ما مجموعه 5 تجارب تم تنفيذها فعلياً واستبعاد 58 تجربة كما في الشكل 56



الشكل Cov29 ، للتجارب والمحاكاة كمخطط شريطي.

A (حمولة الحلة: 260 كغ ، معدل الدوران: 9 دورة في الدقيقة ، زمن العملية: 172 دقيقة ، معدل الرش: 360 غ / دقيقة).

B (حمولة الحلة: 240 كغ ، معدل الدوران: 9 دورة في الدقيقة ، زمن العملية: 248 دقيقة ، معدل الرش: 240 غ / دقيقة) .

C (حمولة الحلة: 250 كغ ، معدل الدوران: 9 دورة في الدقيقة ، زمن العملية: 368 دقيقة ، معدل الرش: 160 غ / دقيقة).

D (حمولة الحلة: 250 كغ ، معدل الدوران: 9 دورة في الدقيقة ، زمن العملية: 345 دقيقة ، معدل الرش: 360 غ / دقيقة).

E (حمولة الأسطوانة: 250 كغ ، معدل الدوران: 9 دورة في الدقيقة ، زمن العملية: 522 دقيقة ، معدل الرش: 240 غ / دقيقة).

أهداف الأتمتة:

1- تخفيض اليد العاملة:

وذلك عند تخفيض عدد الاختبارات والتجارب الفعلية سواء المخبرية أو الإنتاجية وبالتالي تخفيض عدد ساعات التجارب المطلوبة من اليد العاملة حيث يتم الاكتفاء بتجربة واحدة حقيقية وذلك بعد الانتهاء من نمذجة ومحاكاة عملية تلبيس المضغوطات.

2- تخفيض الكلفة:

أيضا وفقا للجدول 25 فإن اجراء 63 تجربة حقيقية فهو بحاجة إلى 16110 كغ من المضغوطات وكل عملية تستغرق 300 دقيقة بالتالي 315 ساعة من التجارب على الآلة وتم تخفيضها بخمس تجارب فعلية كما في الشكل بتجربة واحدة حقيقية بعد اجراء النمذجة واختيار أفضل COV . أيضا من بين التجارب المزمع إجراؤها واعتقادها من قبل الإنتاج أن رفع عدد فرود البخ يؤدي لزيادة الإنتاجية وزيادة معدل التدفق وكل ذلك من شأنه الموافقة على رفع حمولة حلة التلبيس ولكن ذلك يحتاج لدراسة نمذجية قبل التطبيق. للتوضيح ، فقط الأفضل (230 كجم ، 10 دورة في الدقيقة ، 8 فوهات) وأسوأ حالة (290 كجم ، 8 دورة في الدقيقة ، 4 فوهات) موضحة بناءً على هذه النتائج ، تم حساب الحد الأدنى من وقت العملية تصل إلى $C_{v,inter}$ ، بنسبة 6.25% وهي مستقلة عن معدل الرش. من الواضح أن ارتفاع عدد الفتحات يؤدي إلى وقت معالجة أقصر بشكل ملحوظ. علاوة على ذلك ، يمكن ملاحظة أن زيادة معدل الدوران يقلل من وقت العملية الضروري ، في حين أن زيادة حمولة الأسطوانة تزيد من وقت العملية

3-زيادة الإنتاجية:

تهدف المحاكاة إلى دراسة إمكانية الرفع التدريجي (scale up) لكمية التحضيرات المراد تلبيسها دفعة واحدة وذلك دون إلحاق الضرر بالتحضيرية الإنتاجية

5- تخفيض الزمن :

حيث إن إجراء 63 تجربة يستغرق 315 ساعة إنتاجية وهو ما تم تنفيذه بـ 5 تجارب أي 27.5 ساعة حيث في دراستنا استمر التلبيس لمدة 80 دقيقة للحصول على كتلة تلبيس مضافة مساوية 147 مغ وسماكة طبقة تلبيس مكتسبة 0.37 مم حيث يمكن إجراء دراسة التصميم الأمثل لاختيار البارامترات وذلك لتخفيض زمن العملية الإنتاجي ذلك إما بـ

❖ زيادة معدل تدفق فرد البخ :حيث وفقاً للعلاقة في المرجع [7]

$$cov_inter_2 = ccov_inter_1 \sqrt{\frac{v_2}{v_1}} \quad (25)$$

v_2 معدل تدفق فرد البخ في الحالة الثانية .

v_1 معدل تدفق فرد البخ في الحالة الأولى .

cov_inter_2 معامل التباين في كتلة طبقة التلبيس المكتسبة في الحالة الثانية.

cov_inter_1 معامل التباين في كتلة طبقة التلبيس المكتسبة في الحالة الأولى.

ومن ثم التعويض في العلاقة

$$cov_inter_2 \approx \frac{1}{\sqrt{t_2}} \quad (26)$$

حيث عند مضاعفة معدل التدفق سوف ينخفض زمن العملية الإنتاجية ولكن مع الأخذ بالاعتبار مواصفات الجودة المطلوبة .

- ❖ زيادة عدد فرود البخ المستخدمة: إنَّ زيادة عدد فرود البخ يخفض من زمن العملية الإنتاجية بسبب حصول المضغوطات على كمية سائل تلبيس خلال زمن أقصر .
- ❖ زيادة عدد دورات حلّة التلبيس: إنَّ زيادة عدد دورات حلّة التلبيس يحقق تجانس وتقلبية أفضل للمضغوطات مما يسرّع حصولها على نفس كتلة طبقة التلبيس.
- ❖ رفع درجة حرارة هواء الدخ: هذه العملية تسرّع من تبخر المذيب وبالتالي اكتساب المضغوطات لطبقة التلبيس خلال زمن أقصر .
- ❖ دراسة الشكل الهندسي (geometry): تفيد النمذجة في دراسة تصميم حلّة تلبيس جديدة ذات مواصفات تحقق المزج الجيد ودراسة تأثير المجاذيف وتصميمها الهندسي وطريقة توضعها وعددها في حركة المضغوطات

ثانياً الإجراء العملي

1- هدف الدراسة:

دراسة حالة مطبقة في مخبر البحث والتطوير لتلبيس كمية صغيرة من المضغوطات بالاعتماد

على النموذج الفيزيائي للتلبيس (DDM) (Discrete Droplet Method) (طريقة القطيرات المنقطعة)

وهو أحد نماذج الاتصال الفيزيائي حيث إنّ مبدأ عمل هذا النموذج في كل مرحلة يتم فيها عملية البخ،

وكلّما حدث اصطدام بين قطيرة البخ والمضغوطة عندها يحصل ازدياد في كتلة المضغوطة وسماكتها

حتى نهاية زمن العملية المُحدّد من قبل المستخدم.

لذا ستم النمذجة اعتماداً على بارامترات المخبر والتأكد من مدى مطابقة أو انحراف طريقة

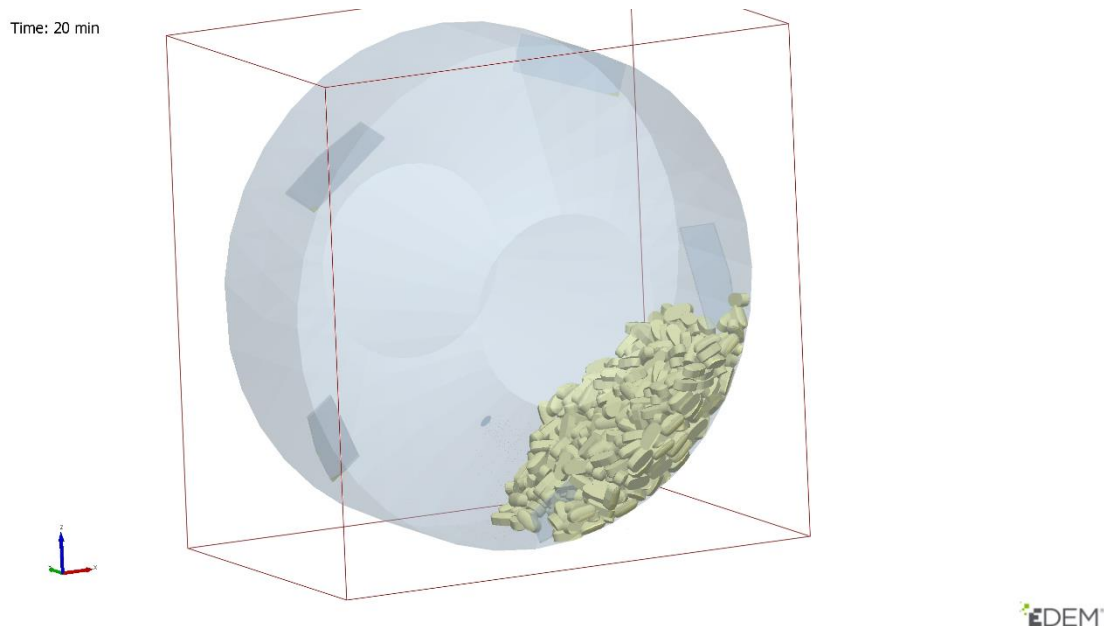
العناصر المنقطعة عن الطريقة التجريبية؛ وبالتالي يمكن التعميم وإجراء تجارب صناعية على نطاق

إنتاجي وليس مخبرياً فقط. حيث تم إجراء محاكاة DEM مع حزمة برنامج EDEM2021

(DEM Solutions Ltd.، Edinburgh، UK) على مضغوطات بيضاوية محدّبة من الطرفين بأبعاد

(21.5*10.5mm) ونمذجة 0.66 كغ من المضغوطات (أي ما يعادل 550 مضغوطة) (الشكل

(29).



الشكل 30 حَلّة التلبيس المخبرية وهي تحتوي على 0.66 كغ من المضغوطات البيضاء.

في هذا العمل، تمّ التحقق في عملية تلبيس نشطة، والتي تنطبق عليها لوائح صارمة فيما يتعلق

بتوحيد التلبيس ($COV_{inter} < 6.25\%$). لتحقيق نتائج موثوقة.

2- خطوات العمل:

1. تعريف (bulk materials) لكل من المضغوطات وسائل التلبيس، كما في الجدول 6.

جدول 7 خصائص bulk material لكل من المضغوطات وسائل التلبيس:

خصائص مواد الجسيمات لكل من (المضغوطات وقطيرات البخ) bulk material properties for (tablets and spray droplets)	
معامل بواسون للمضغوطات [3]	0.3
معامل القص للمضغوطات [3]	$1 * 10^6 \text{ pa}$

كثافة المضغوطات	$1390(kg/m^3)$
كثافة سائل التلبيس	$780 kg/m^3$
قطر قطيرة البخ	0.1 mm

2. تم تعريف مادة حلّة التلبيس ضمن قسم (equipment material) وهي مادة الفولاذ ss316

الموافق للصناعات الدوائية GMP. كما في الجدول 7.

جدول 8 الخواص الهندسية لحلّة التلبيس:

الخصائص الهندسية للمادة (الفولاذ) كروم عالي SS316 [10] [11]	
معامل بواسون	0.3
معامل القص	$7 * 10^{10} pa$
الكثافة	$7800(kg/m^3)$

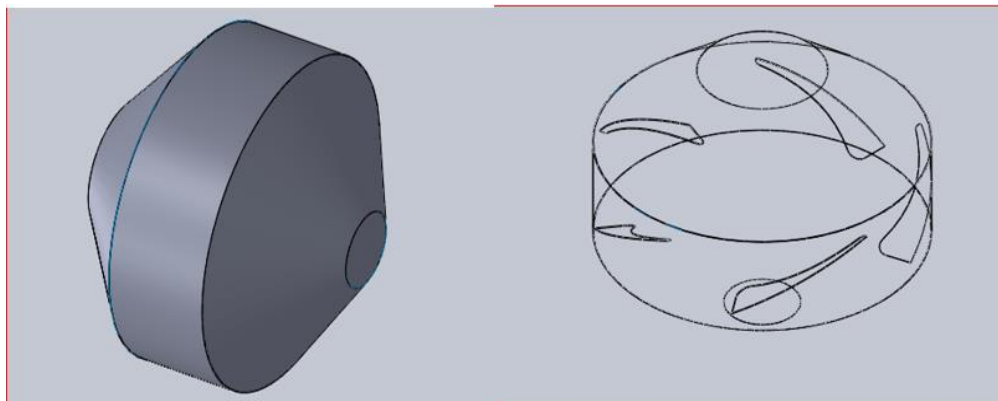
3. تعريف معاملات التفاعل بين المضغوطات وحلّة التلبيس كما في الجدول 8.

معاملات التفاعل بين المضغوطات وجسم حلّة التلبيس المعدنية [12]		
	بين المضغوطات	المضغوطة مع الفولاذ كروم عالي SS316
Coefficient Of Restitution معامل الارتداد	0.78	0.78
Coefficient Of static Friction معامل الاحتكاك السكوني	0.15	0.39
Coefficient Of Rolling friction معامل الاحتكاك التدحرجي	0.01	0.01

جدول 9 معاملات التفاعل.

4. تمّ رسم الشكل الهندسي الخاص لحلّة التلبيس مع مجاذيفها على برنامج SOLIDWORK

تم رسم (الشكل 30) بناء على أبعاد حلّة التلبيس المخبرية المعروضة في الجدول (9) أدناه:



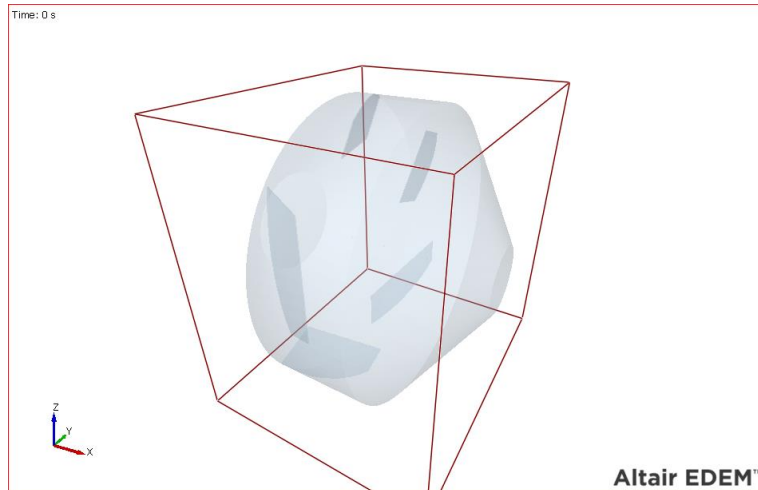
الشكل 31 حلّة التلبيس المخبرية في برنامج SOLIDWORK

جدول 10 مواصفات حلّة التلبيس المخبرية المستخدمة

حلّة التلبيس المخبرية R&D coater pan		
الحجم	2 L	
السعة	1.5 Kg	
الأبعاد	القطر	300mm
	الارتفاع	228mm
	قطر الفوهة	175mm
سرعة دوران الحلّة	4rpm	

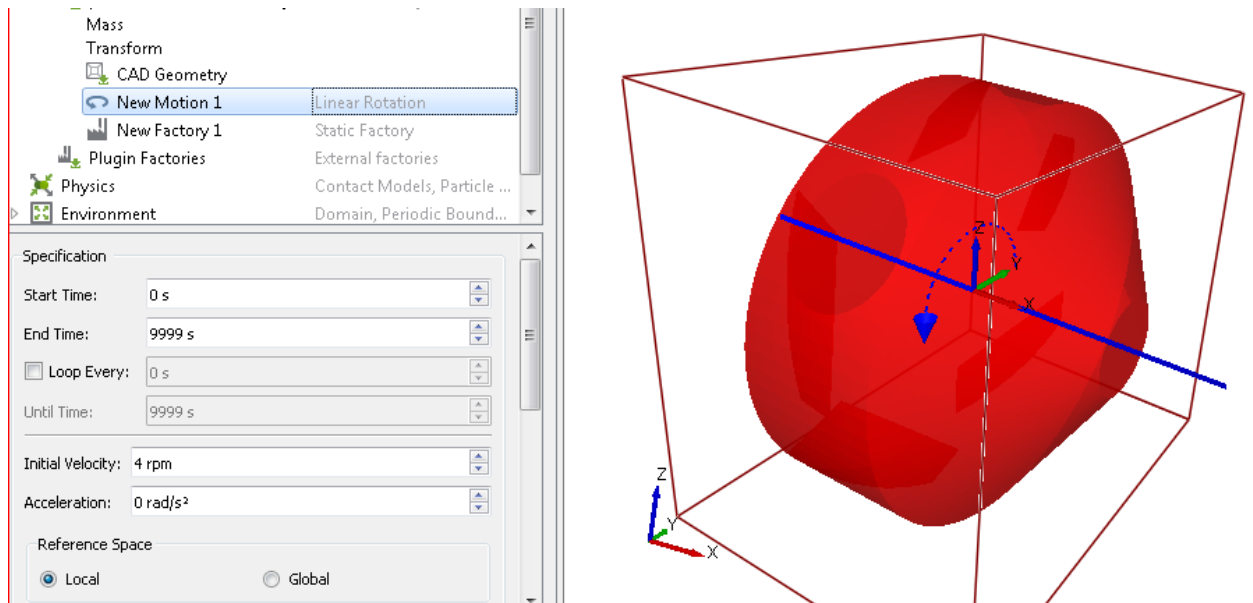
5. تمّ تصدير حَلّة التلبيس إلى برنامج EDEM بصيغة (IGS) (إحدى صيغ الـ CAD) ضمن

import geometry (الشكل 31).



الشكل 32 حَلّة التلبيس المخبرية بعد تصديرها لبرنامج EDEM.

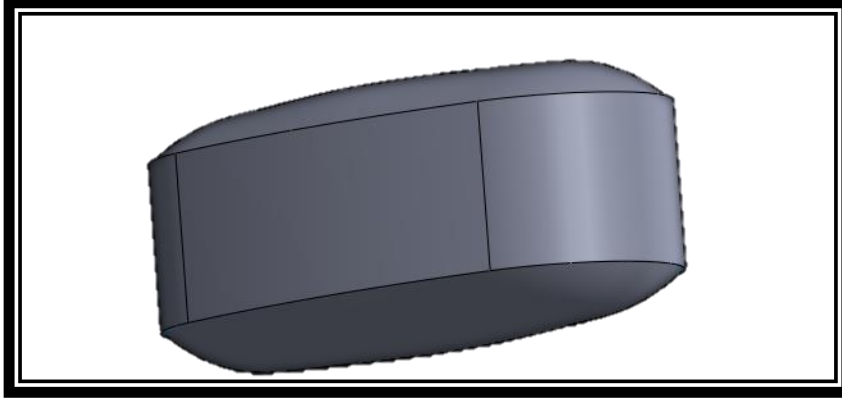
6. تم تحديد اتجاه دوران حَلّة التلبيس ومحور الدوران والسرعة وزمن البدء في الدوران في برنامج edem (الشكل 32).



الشكل 33 محور الدوران لحَلّة التلبيس.

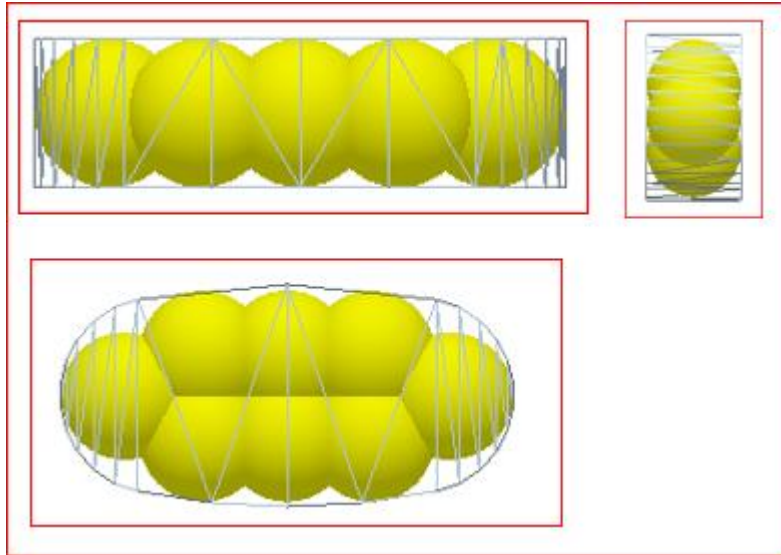
7. تمّ رسم المضغوطة البيضاوية المحدّبة من الطرفين ذات الأبعاد (21.5*10.5 mm) وسماكة

(6.40 mm) في برنامج SOLIDWORK (الشكل 33).



الشكل 34 الشكل الهندسي ثلاثي الأبعاد للمضغوطة في برنامج SOLIDWORK.

8. تمّ تصدير المضغوطة بصيغة igs إلى برنامج EDEM ثم تقسيم المضغوطة (mesh) إلى كرات في برنامج EDEM لتتوافق مع الشكل الهندسي CAD المرسوم (الشكل 34).



الشكل 35 المسقط الرأسي والأفقي والجانبية للمضغوطة.

حيث يبين الشكل 34 مساقط المضغوطة التي تم إنشاؤها باستخدام طريقة الكرات الملتصقة في برنامج

EDEM مع شبكة من الخطوط. تم تحديد البارامترات المتعلقة بعدد الجزيئات المنشأة ، وهي:

✓ درجة النعومة.

✓ أصغر نصف قطر جسيم.

✓ عدد خلايا الشبكة.

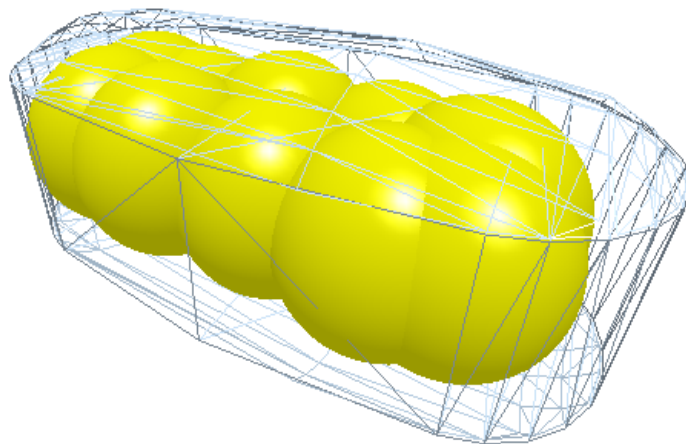
حيث يوضح كل من الجدول 10 والشكل 35 كيفية إنشاء جزيئات من شكل المضغوطة اعتماداً

على البارامترات.

جدول 11 إجراءات إنشاء الجزيئات من القالب.

Generate Particle from Template	
عدد الكرات المقطعة	10
عدد خلايا الشبكة Number of grid cell	X=20,Y=20,Z=20
درجة النعومة Smoothing value	5
أصغر نصف قطر Minimum sphere radius (mm)	3

Time: 0.462023 min



Altair EDEM™

tablet Spheres

☐ Edit Contact Radius

Display Templates: New Template 0 ▾

	Name	Position X (mm)	Position Y (mm)	Position Z (mm)	Physical Radius (mm)
6	sphere 6	-4.9038	1.641	-0.195877	3.32992
7	sphere 7	3.10845	1.641	-0.195877	3.32992
8	sphere 8	6.11304	-1.09096	-0.195877	3.32992
9	sphere 9	-6.90686	1.18567	0.195877	3.32992
10	sphere 10	-6.90686	-1.09096	0.195877	3.32992

Generate Particle from Template

Select Template: New Template 0 ▾ Edit...

Number of Grid Cells:

X: 20 ▾ Smoothing Value: 5 ▾

Y: 20 ▾ Minimum Sphere Radius: 3 mm ▾

Z: 20 ▾ ☒ Hard template boundary

Generate Particle

الشكل 36 إنشاء جزيئات من القالب في برنامج edem.

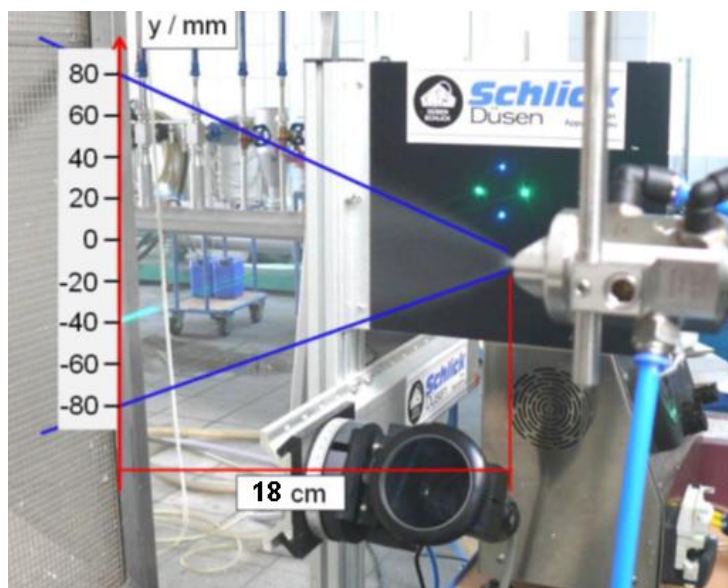
9. تحديد موضع وزاوية فرود البخ

تم تمثيل فرد البخ وزاوية ميلان فرود البخ 45 درجة عن سرير المضغوطات وضبط ارتفاع فرود

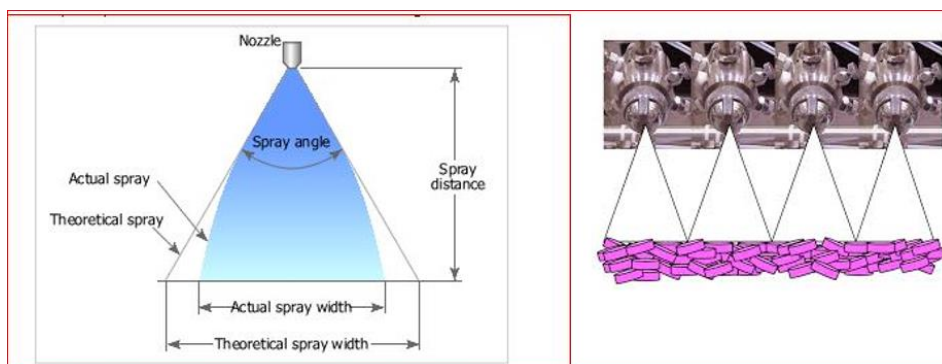
البخ مسافة 18 cm عن مستوى سرير المضغوطات وذلك وفقاً للحالة التجريبية المراد إنشاء

النمذجة لها في الجدول 11. حيث يبين الشكل 36 صورة توضيحية لفرد البخ والشكل 37 يبين

بارامترات فرد البخ.



الشكل 37 صورة توضيحية لفرد البخ المستخدم ماركة schlick.



الشكل 38 بارمترات فرد البخ.

جدول 12 مواصفات فرد البخ وضبطه في النمذجة:

1	عدد فرود البخ
1mm	قطر ابرة البخ المستخدمة
180 mm	المسافة بين فرد البخ و سطح المضغوطات
45°	زاوية ميلان فرد البخ عن المحور y

10. تمّ انشاء مصنع ديناميكي (dynamic factory) لإنشاء عدد غير محدود من الجزيئات؛

وذلك لتمثيل قطيرات البخ لسائل التلبيس، وتمّ اختيار النوع الديناميكي بسبب الحاجة إلى

استمرار البخ طيلة مدّة المعالجة، وتمّ إدخال البارامترات التالية في مصنع جزيئات سائل البخ

الجدول 12.

جدول 13 مصنع جزيئات البخ

80 min = 4800s	زمن البخ المستغرق في العملية
0.6386 Kg	وزن سائل التلبيس المستخدم
0.000133 kg/s	تدفق سائل التلبيس في الفرد = وزن سائل التلبيس المستخدم / زمن البخ / عدد فرود البخ

11. تمّ انشاء مصنع ستاتيكي (static factory) لإنشاء عدد محدود من الجزيئات وذلك لتمثيل

المضغوطات وتمّ اختيار النوع الستاتيكي بسبب الحاجة إلى إنشاء كمية محددة ؛حيث يتم

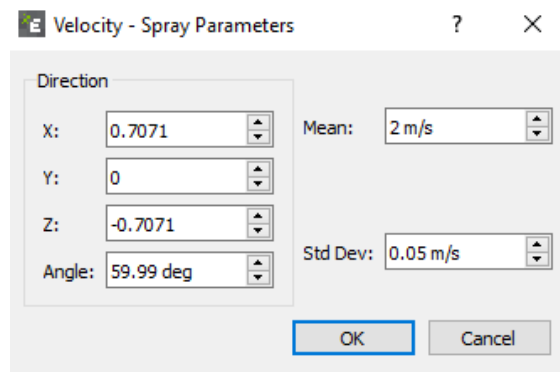
تعريف الكمية المحددة تلك إما بالعدد أو بالوزن والتوقف عن الإنشاء بعد انجاز الهدف

المطلوب وهو 0.66 كغ من المضغوطات.

12. تمّ تحديد سرعة البخ (m/s) 2 وزاوية التريز 60 درجة. وتحديد اتجاه التريز. ومساقطه وذلك

بالاتجاه الموجب على المسقط x والسالب للأسفل باتجاه z؛ وذلك تبعاً لموضع فرد البخ

(الشكل 38).



الشكل 39 بارامترات سرعة البخ.

13. الانتقال لتحديد بارامترات المحاكاة (simulator)

جدول 14 بارامترات المحاكاة (simulator)

بارامترات المحاكاة (simulator)	
زمن العملية	1200 s
زمن الحفظ لكل خطوة زمنية Data save	0.5 s
طول الخطوة الزمنية Rayleigh time step	0.00015122s
أصغر نصف قطر في النمذجة Rmin	0.05 mm
حجم الخلية Cell size	250Rmin = 12.5 mm

3- معامل الاختلاف في توزيع كتلة التلبيس (COV_{inter}):

يتم قياس تقلبية التلبيس بين الأقراص؛ وفقًا لتعريفها لمعامل تغير كتلة التلبيس بين المضغوطات،

وهي:

$$COV_{inter} = \frac{\sigma}{\bar{m}} \quad (13)$$

حيث :

$\bar{m}$ متوسط كتلة التلبيس خلال الوقت الإجمالي، يتم الحصول عليها مباشرة من بيانات النتائج التي

تم تصديرها من برنامج EDEM؛ اعتمادًا على خوارزمية الاتصال بين جزيئات المضغوطات

وجزيئات البخ.

σ هو الانحراف المعياري الذي يمكن الحصول عليه من المعادلة الآتية:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (m_i - \bar{m})^2} \quad (14)$$

حيث يمثل m_i الكتلة المضافة التي يحصل عليها كل قرص فردي ناتج عن المرور عبر منطقة

البخ ، و N يمثل إجمالي عدد الأقراص المتولدة في حلة التلبيس.

4- بارامترات المستحضر (دراسة حالة):

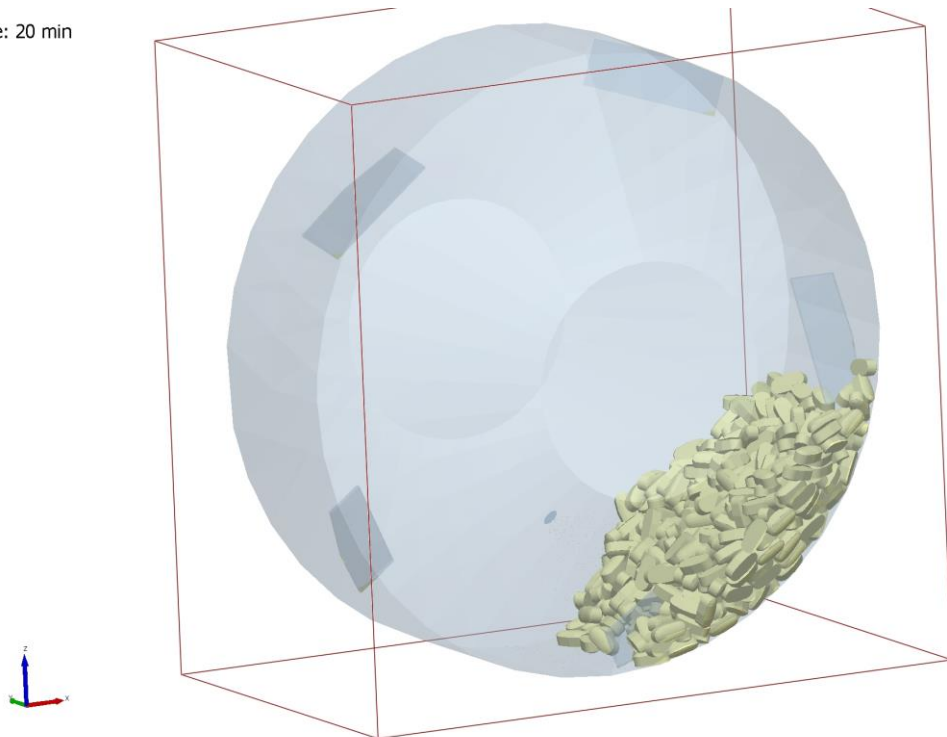
يوضح الجدول 14 بارامترات المستحضر المراد إجراء نمذجة للحالة التجريبية

جدول 15 بارامترات المستحضر:

21.5*10.5 mm		أبعاد المضغوطة
بيضوي محدب.		شكل المضغوطة
1157mg	الحد الأدنى	مجال وزن المضغوطات قبل التلبيس
1218mg	وسطي الوزن	
1279mg	الحد الأعلى	
1218mg		وسطي وزن عشر مضغوطات قبل التلبيس
6.20mm	الحد الأدنى	

6.40mm	وسطي السماكة	سماكة المضغوطة قبل التلبيس
6.60mm	الحد الأعلى	
0.66974 Kg		وزن كامل المضغوطات قبل التلبيس
0.75142 Kg		وزن كامل المضغوطات بعد التلبيس
18%		نسبة المواد الصلبة في سائل التلبيس
1420 mg		وزن المضغوطة بعد التلبيس
1349 mg	الحد الأدنى	حدود الوزن للملبسة للمجال المسموح به
1420 mg	وسطي الوزن	
1491 mg	الحد الأعلى	
147 mg		مقدار الزيادة النظري للمضغوطة بعد التلبيس
6.25 mm	الحد الأدنى	سماكة المضغوطة بعد التلبيس
6.50 mm	وسطي السماكة	
6.75 mm	الحد الأعلى	
148 mg		مقدار الزيادة العملي للمضغوطة بعد التلبيس

Time: 20 min



الشكل 40 حَلّة التلبيس المخبرية المراد دراستها.

5- استعراض النتائج التجريبية في المخبر:

تم إجراء عملية التلييس المخبرية لمدة 80 دقيقة، وتسجيل وسطي كتلة 10 مضغوطات ووسطي

سماكة 10 مضغوطات كل 20 دقيقة، كما في الجدول 15.

جدول 16 النتائج التجريبية في المخبر:

المرحلة	التوقيت	الزمن بالدقيقة في كل مرحلة	الزمن الكلي	وسطي كتلة عشر مضغوطات mg	الكتلة المكتسبة خلال المرحلة	الكتلة المضافة عن وسطي كتلة المضغوطة قبل التلييس 1218 mg	وسطي سماكة عشر مضغوطات mm	سماكة طبقة التلييس المكتسبة خلال كل مرحلة mm	سماكة طبقة التلييس المكتسبة عن السماكة الأولية للمضغوطة قبل التلييس (mm 6.40)
1	10:20	0	0	1218	0	0	6.4	0	0
2	10:20-10:50	20	20	1247	29	29	6.44	0.04	0.04
3	10:50-11:20	20	40	1288	41	70	6.52	0.08	0.12
4	11:20-11:50	20	60	1321	33	103	6.6	0.08	0.2
5	11:50-12:20	20	80	1365	44	147	6.77	0.17	0.37

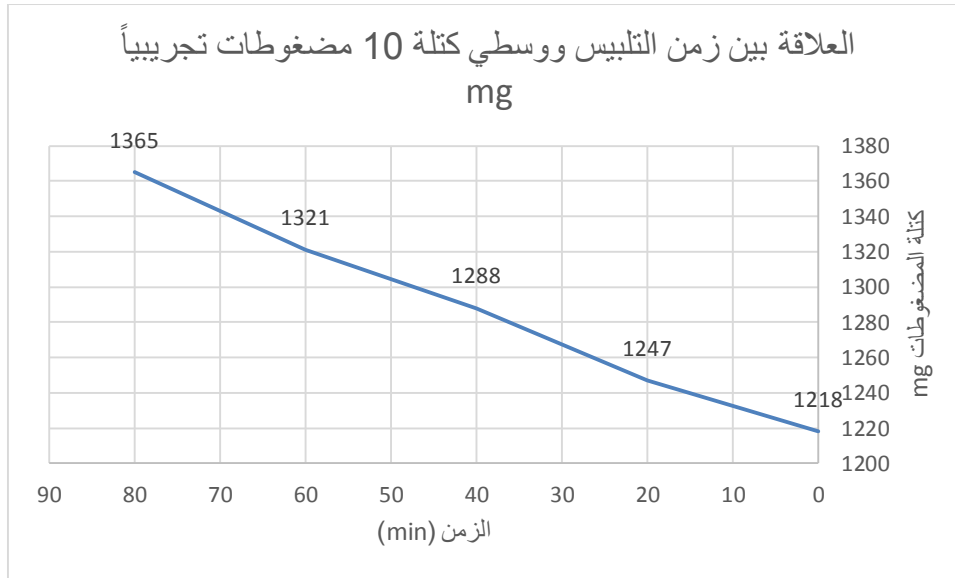
5-1 خطوات العمل:

5-1-1 الخطوة الأولى:

استنتاج المعادلة الرياضية للعلاقة بين الزمن بالدقيقة وكتل المضغوطات تجريبياً في المخبر

تم إدخال النتائج التجريبية في المخبر حسب الجدول 15 التي تربط بين وسطي كتلة 10

مضغوطات بعد التلييس (mg) والزمن المستهلك بعملية التلييس بالدقيقة على برنامج (excel).



الشكل 41 مخطط العلاقة بين الزمن ووسطي كتلة 10 مضغوطات تجريبياً mg.

تم استنتاج المعادلة الرياضية عن طريق برنامج الإكسل وإجراء تحقق من مدى دقة المعادلات عن طريق

التعويض في المعادلات المستنتجة ثم حساب نسبة الخطأ كما في الخطوات الآتية:

1- معادلة خطية من الدرجة الأولى

$$Y = 1.84X + 1214.2 \quad (15)$$

$$R^2 = 0.9959$$

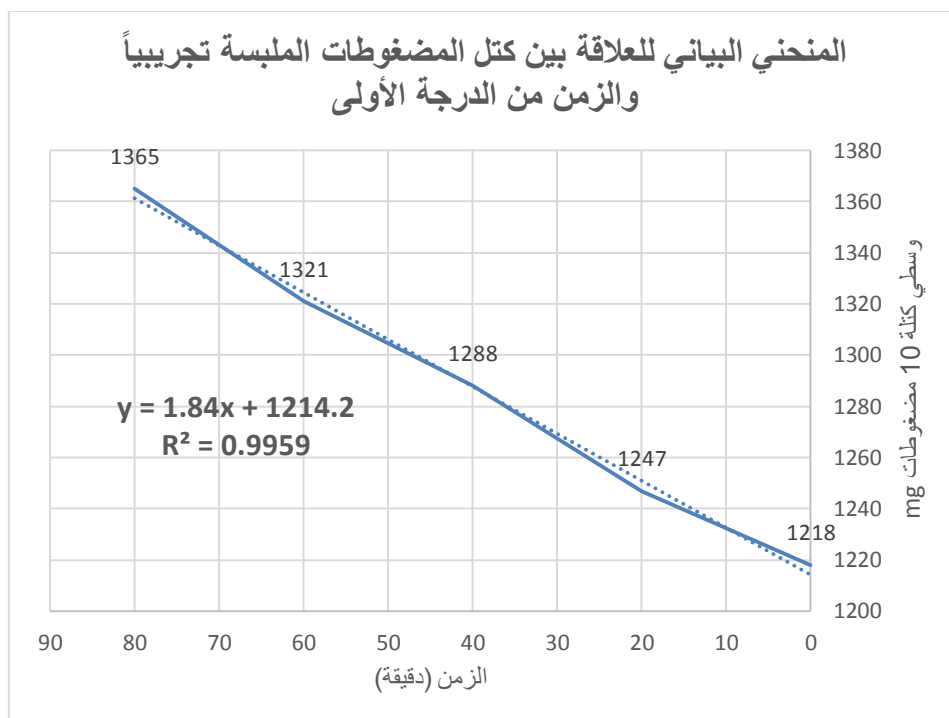
X الزمن بالدقيقة (min).

Y كتلة المضغوطة بعد التلبيس (mg).

حيث R^2 يسمى معامل الانحدار وهو قيمة بين الصفر والواحد، وكلما كانت القيمة أقرب إلى (1) يدل ذلك على تشابه وتطابق المنحني المستنتج مع القيم المدخلة.

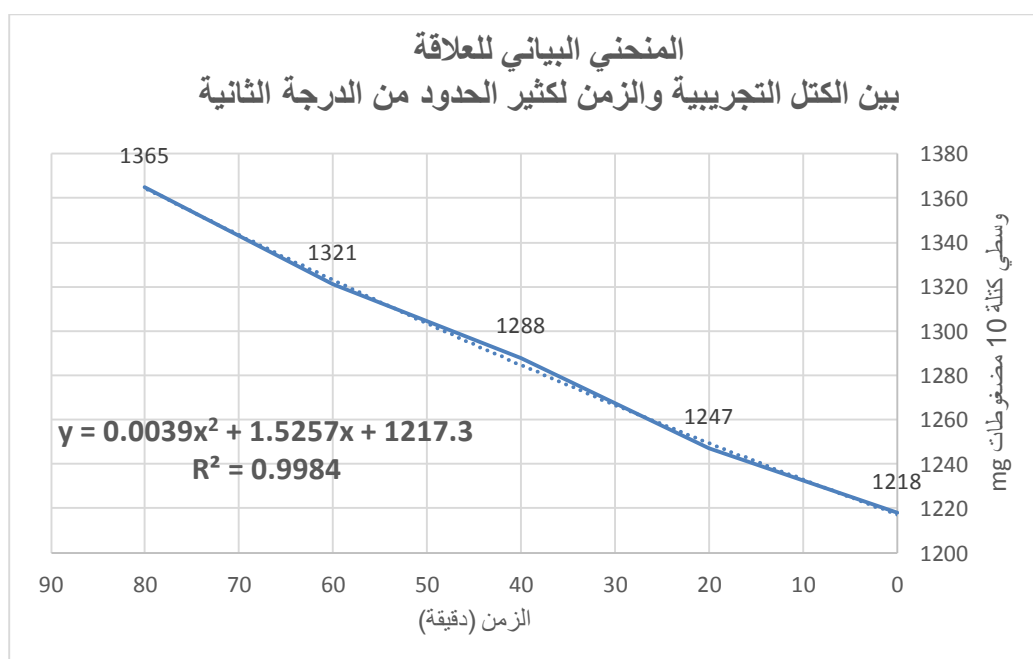
جدول 16 حساب نسبة الخطأ والانحراف عند التعويض في المعادلة الخطية من الدرجة الأولى:

الزمن المستهلك (دقيقة)	وسطي كتلة 10 مضغوطات ملبسة تجريبياً (mg) (القيمة الحقيقية)	الكتلة الناتجة من استنتاج المعادلة الخطية من الدرجة الأولى $y=1.84X+1214.2$ $R^2 = 0.9959$ (القيمة التقريبية)	الفرق بالقيمة المطلقة بين القيمة التقريبية والقيمة الحقيقية	نسبة الخطأ يساوي القيمة التقريبية - القيمة الحقيقية / القيمة الحقيقية * 100%
0	1218	1214.2	3.8	0.312%
20	1247	1251	4	0.321%
40	1288	1287.8	0.2	0.016%
60	1321	1324.6	3.6	0.273%
80	1365	1361.4	3.6	0.264%
وسطي نسبة الخطأ				0.237%



الشكل 42 المنحني البياني للعلاقة الخطية من الدرجة الأولى بين كتل المضغوطات الملبسة تجريبياً والزمن

2- معادلة كثير حدود من الدرجة الثانية:



الشكل 43 المنحني البياني للعلاقة بين الكتل التجريبية والزمن لكثير الحدود من الدرجة الثانية.

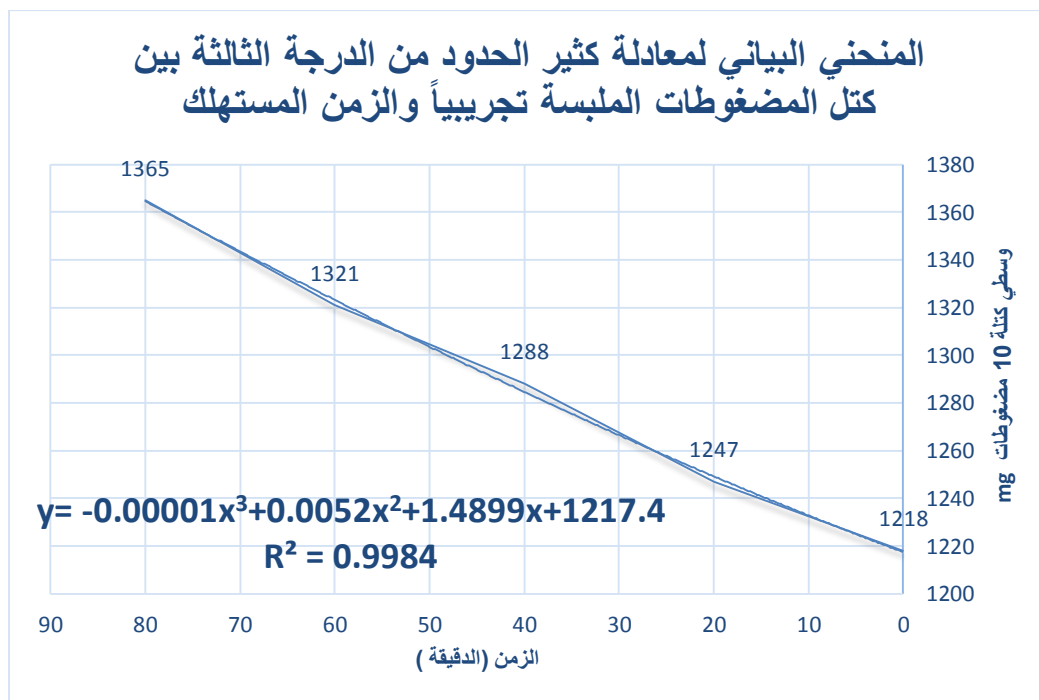
$$y = 0.0039x^2 + 1.5257x + 1217.3 \quad (16)$$

$$R^2 = 0.9984$$

جدول 17 حساب نسبة الخطأ عند التعويض بمعادلة كثير الحدود من الدرجة الثانية.

الزمن المستهلك (دقيقة)	وسطى كتلة 10 مضغوطات ملبسة تجريبياً (mg) (القيمة الحقيقية)	الكتلة الناتجة من التعويض في معادلة كثير الحدود من الدرجة الثانية $y=0.0039x^2+1.5257x$ $+1217.3$ $R^2 = 0.9984$ (القيمة التقريبية)	الفرق بالقيمة المطلقة بين القيمة التقريبية والقيمة الحقيقية	نسبة الخطأ يساوي القيمة التقريبية - القيمة الحقيقية / القيمة الحقيقية $\times 100^*$
0	1218	1217.3	0.7	0.057%
20	1247	1249.374	2.374	0.190%
40	1288	1284.568	3.432	0.266%
60	1321	1322.882	1.882	0.142%
80	1365	1364.316	0.684	0.050%
وسطى نسبة الخطأ				0.141%

3- معادلة كثير حدود من الدرجة الثالثة:



الشكل 44 المنحني البياني لمعادلة كثير حدود من الدرجة الثالثة بين كتل المضغوطات الملبسة تجريبياً والزمن المستهلك

$$y = -0.00001 x^3 + 0.0052x^2 + 1.4899x + 1217.4 \quad (17)$$

$$R^2 = 0.9984$$

جدول 18 حساب نسبة الخطأ عند التعويض في معادلة كثير الحدود من الدرجة الثالثة

نسبة الخطأ يساوي القيمة التقريبية - القيمة الحقيقية القيمة الحقيقية 100*	الفرق بالقيمة المطلقة بين القيمة التقريبية والقيمة الحقيقية	الكتلة الناتجة من التعويض في معادلة كثير الحدود من الدرجة الثالثة $y = -0.00001x^3 + 0.0052x^2 +$ $1.4899x + 1217.4$ $R^2 = 0.9984$ (القيمة التقريبية)	وسطي كتلة 10 مضغوطات ملبسة تجريبياً (mg) (القيمة الحقيقية)	الزمن المستهلك (دقيقة)
0.049%	0.6	1217.4	1218	0
0.176%	2.198	1249.198	1247	20
0.258%	3.324	1284.676	1288	40
0.178%	2.354	1323.354	1321	60
0.018%	0.248	1364.752	1365	80
0.136%	وسطي نسبة الخطأ			

بالمقارنة بين جداول التحقق من دقة المعادلات الرياضية المستتجة كان وسطي نسبة الخطأ

مساوياً 0.237% عند المعادلة الرياضية من الدرجة الأولى.

0.141% عند معادلة كثير الحدود من الدرجة الثانية.

0.136% عند معادلة كثير الحدود من الدرجة الثالثة.

لذا تم اختيار نسبة الخطأ الصغرى وهي لمعادلة كثير الحدود من الدرجة الثالثة واعتماد هذه

المعادلة.

2-1-5 الخطوة الثانية:

إيجاد كتلة المضغوطات في أثناء التلبيس والكتلة المضافة كل 0.5 دقيقة:

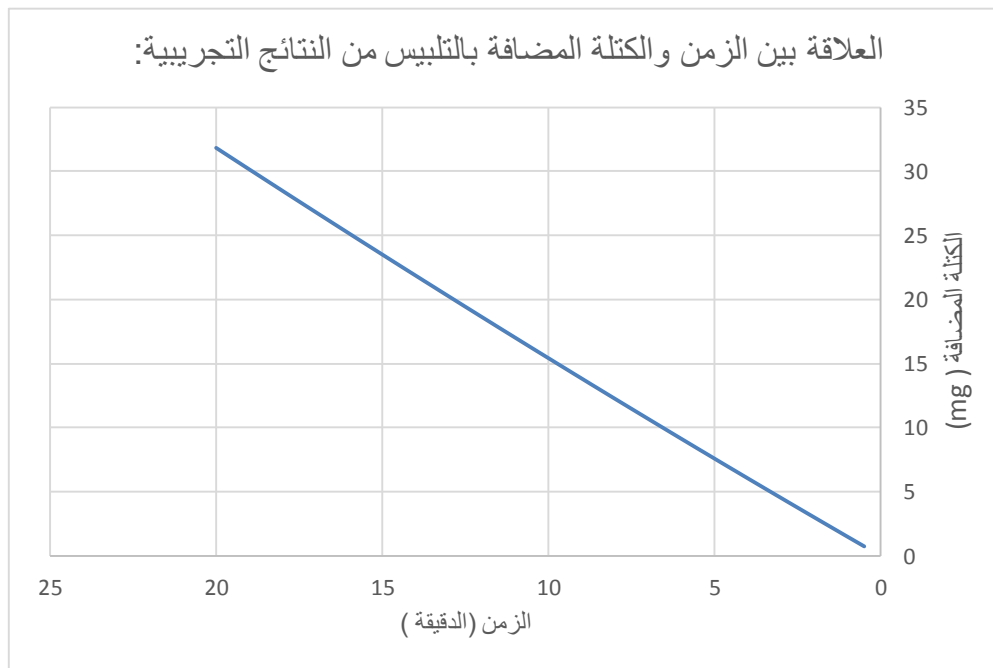
تم التعويض في المعادلة 17 للعلاقة الخطية من الدرجة الثالثة عند خطوة زمنية مختارة، وهي

0.5 دقيقة حتى الوصول لزمن نهاية العملية في المرحلة الأولى وهي 20 دقيقة فقط (حيث لم يتم إتمام

الزمن لـ 80 دقيقة بسبب الحاجة للمقارنة لاحقاً مع زمن نمذجة 20 دقيقة فقط؛ نظراً لزمن النمذجة الطويل

المستهلك على الحاسب) وتم حساب كتلة المضغوطات mg والكتلة المضافة (كتلة طبقة التلبيس المكتسبة

عن كتلة المضغوطات النواة قبل التلبيس mg .



الشكل 45 العلاقة بين الزمن والكتلة المضافة mg تجريبياً

جدول 18 العلاقة بين الزمن بالدقيقة، وكتلة المضغوطات والكتلة المضافة mg:

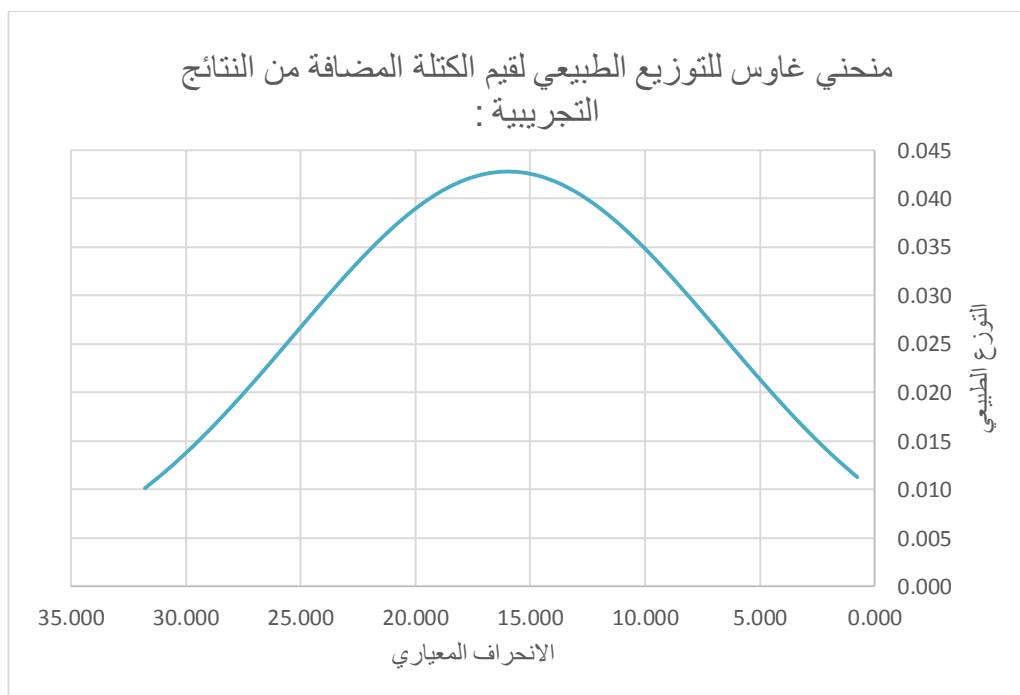
الزمن المستهلك (دقيقة)	كتلة المضغوطات الناتجة من التعويض في المعادلة 16 (mg)	الكتلة المضافة (mg)	الزمن المستهلك (دقيقة)	كتلة المضغوطات الناتجة من التعويض في المعادلة 16 (mg)	الكتلة المضافة (mg)
0.5	1218.146	0.746	10.5	1233.606	16.206
1	1218.895	1.495	11	1234.405	17.005
1.5	1219.647	2.247	11.5	1235.206	17.806
2	1220.401	3.001	12	1236.01	18.61
2.5	1221.157	3.757	12.5	1236.817	19.417
3	1221.916	4.516	13	1237.626	20.226
3.5	1222.678	5.278	13.5	1238.437	21.037
4	1223.442	6.042	14	1239.25	21.85
4.5	1224.209	6.809	14.5	1240.066	22.666
5	1224.978	7.578	15	1240.885	23.485
5.5	1225.75	8.35	15.5	1241.706	24.306
6	1226.524	9.124	16	1242.529	25.129
6.5	1227.301	9.901	16.5	1243.354	25.954
7	1228.081	10.681	17	1244.182	26.782
7.5	1228.863	11.463	17.5	1245.012	27.612
8	1229.647	12.247	18	1245.845	28.445
8.5	1230.434	13.034	18.5	1246.68	29.28
9	1231.223	13.823	19	1247.517	30.117
9.5	1232.015	14.615	19.5	1248.356	30.956
10	1232.809	15.409	20	1249.198	31.798

3-1-5 الخطوة الثالثة:

انشاء منحني غاوس للنتائج التجريبية:

جدول 19 العلاقة بين التوزيع الطبيعي والانحراف المعياري للنتائج التجريبية:

الزمن (دقيقة)	الكتلة المضافة (المستنتجة من العلاقة الخطية)	normal distance	الزمن (دقيقة)	الكتلة المضافة (المستنتجة من العلاقة الخطية)	normal distance
0.5	0.746	0.013	10.5	16.206	0.041
1	1.495	0.015	11	17.005	0.041
1.5	2.247	0.017	11.5	17.806	0.040
2	3.001	0.018	12	18.610	0.039
2.5	3.757	0.020	12.5	19.417	0.038
3	4.516	0.022	13	20.226	0.036
3.5	5.278	0.024	13.5	21.037	0.035
4	6.042	0.026	14	21.850	0.033
4.5	6.809	0.028	14.5	22.666	0.031
5	7.578	0.030	15	23.485	0.029
5.5	8.350	0.032	15.5	24.306	0.027
6	9.124	0.034	16	25.129	0.024
6.5	9.901	0.035	16.5	25.954	0.022
7	10.681	0.037	17	26.782	0.020
7.5	11.463	0.038	17.5	27.612	0.018
8	12.247	0.039	18	28.445	0.016
8.5	13.034	0.040	18.5	29.280	0.014
9	13.823	0.041	19	30.117	0.013
9.5	14.615	0.041	19.5	30.956	0.011
10	15.409	0.041	20	31.798	0.010



الشكل 46 منحني الانحراف المعياري في نتائج الكتلة المضافة للنتائج التجريبية

RSD%	Std.s	average
0.58	9.31	15.970

نلاحظ أن قيمة الانحراف المعياري النسبي (relative standard deviation) هي 0.58 %؛

أي أقل من 6.25 % وهذه القيمة ضمن الحدود المسموح بها ،حيث إن RSD يجب ألا تتجاوز 6.25 %

حسب دستور الأدوية 2011 [7] [8] [10] [12].

6- إجراءات استخلاص النتائج من البرنامج (simulation results)

6-1 الخطوة الأولى :

تم تنفيذ النمذجة لمدة 20 دقيقة فقط (1200 ثانية)؛ نظراً للوقت الكبير المستهلك لإنجاز النمذجة

(بسبب مواصفات الحاسوب ودقة النتائج حيث كلما كان قطر قطيرات البخ أصغر ازداد زمن النمذجة

المستهلك).

تمت قراءة النتائج كل 0.5 دقيقة (علماً أنه تم اختيار تخزين النتائج كل 0.5 ثانية).

وتم الحصول على حجم سائل التلبيس المضاف إلى المضغوطات ثم ضربها بكثافة سائل التلبيس

للحصول على الكتلة المضافة حسب المعادلة (17).

$$m_{added\ mass} = V_{added\ liquid\ volume} * \rho_{liquid} \quad 18$$

فيما يخص سائل التلبيس، فهو يحتوي على كحول وماء (مذيبات) وهي وسائط نقل مادة التلبيس

وهذه المذيبات تتبخر في أثناء عملية بخ سائل التلبيس بسبب الحرارة، وبالتالي للحصول على الكتلة

المضافة الفعلية يجب ضرب الكتلة المضافة الناتجة من المحاكاة بنسبة الصلب، وهي المواد الفعلية التي

سيتم اكتسابها لكل مضغوطة.

$$m_{real\ added\ mass} = m_{added\ mass} * 18\% \quad 19$$

تمّ الاعتماد على مقياس تغير الحجم المضاف كل 0.5 دقيقة وهو مجال متدرج ذو 6 قيم، وتمّ

قياس المتوسط الحسابي للقيم الست في كل خطوة زمنية (المعادلة 19).

$$m_{average} = \frac{\sum_{i=1}^{i=6} m_i}{6} \quad 20$$

تمّ حساب الانحراف المعياري (Standard Deviation) للكتلة المضافة لكل خطوة زمنية ثم

الحساب لكل العينات معاً (انحراف العينات عن المتوسط) (المعادلة 20).

$$STDV.S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n |m_i - \bar{m}|^2}{n}} \quad 21$$

أيضاً تمّ حساب الانحراف المعياري النسبي RSD (Relative Standard Deviation)، وهو

ناتج قسمة الانحراف المعياري على المتوسط الحسابي (حيث تمّ الحساب لكل خطوة زمنية على حدة ولكل

البيانات معاً).

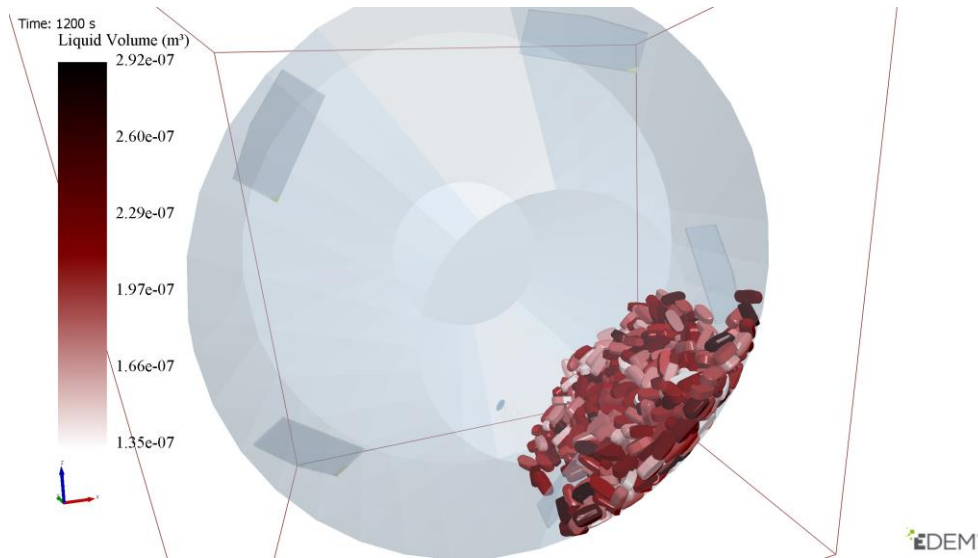
$$RSD\% = \frac{STDV.S}{\bar{m}} * 100 \quad 22$$

يبين الشكل 45 نتائج النمذجة على برنامج EDEM حيث يظهر الحجم المضاف

للمضغوطات بعد التلبيس، ويبين على شكل مجال بحسب اللون، يتم تصدير النتائج لبرنامج الإكسل

وجداء القيم بكثافة سائل التلبيس بعد تعويض نسبة الصلب؛ وبالتالي الحصول على الكتلة المضافة

للمضغوطات بعد التلبيس.



الشكل 47 الحجم المضاف والمكتسب من سائل التليبيس للمضغوطات.

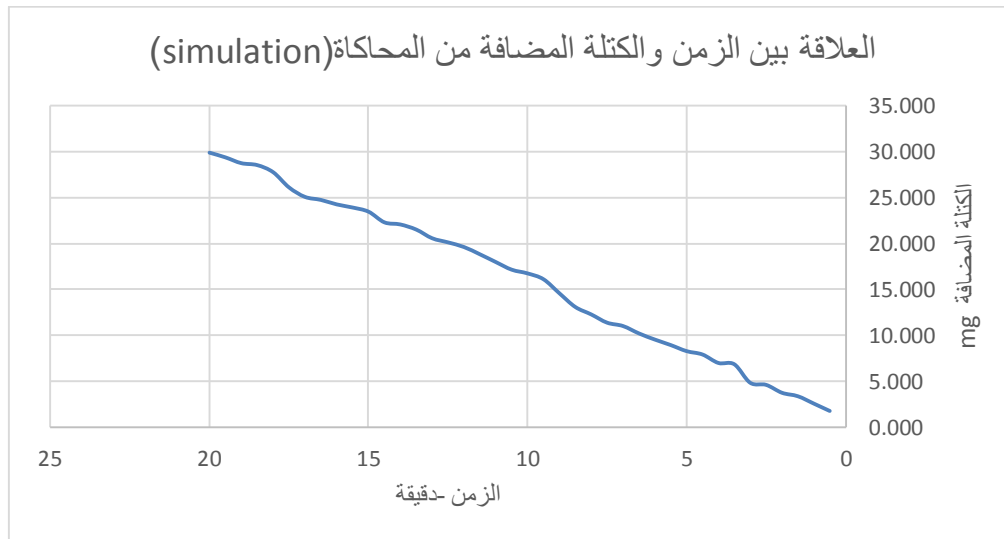
2-6 الخطوة الثانية :

إنشاء جدول ومخطط بياني للعلاقة بين الزمن والكتلة المضافة mg من المحاكاة (simulation).

جدول 20 نتائج برنامج edem لكل من الزمن بالدقيقة والكتلة المضافة mg:

Time (min)	simulation added mass (mg)	Time (min)	simulation added mass (mg)
0.5	1.775	10.5	17.176
1	2.577	11	18.006
1.5	3.378	11.5	18.853
2	3.756	12	19.642
2.5	4.619	12.5	20.147
3	4.847	13	20.599
3.5	6.863	13.5	21.544
4	7.006	14	22.101
4.5	7.928	14.5	22.333

5	8.295	15	23.494
5.5	8.958	15.5	23.948
6	9.559	16	24.289
6.5	10.228	16.5	24.781
7	11.033	17	25.108
7.5	11.398	17.5	26.138
8	12.299	18	27.799
8.5	13.111	18.5	28.571
9	14.602	19	28.782
9.5	16.132	19.5	29.414
10	16.768	20	29.929



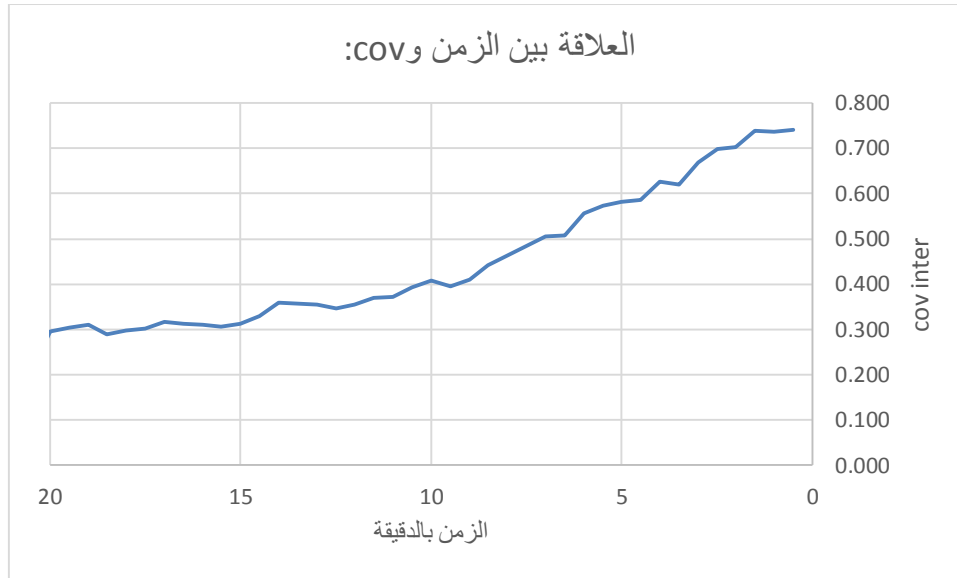
الشكل 48 مخطط العلاقة بين الزمن بالدقيقة والكتلة المضافة mg من النمذجة.

3-6 الخطوة الثالثة:

إنشاء جدول ومنحني بياني للعلاقة بين الزمن ومعامل الاختلاف (coefficient of variation) للكتلة المضافة.

جدول 21 العلاقة بين الزمن بالدقيقة ومعامل الاختلاف النسبي للكتلة المضافة (coefficient of variation).

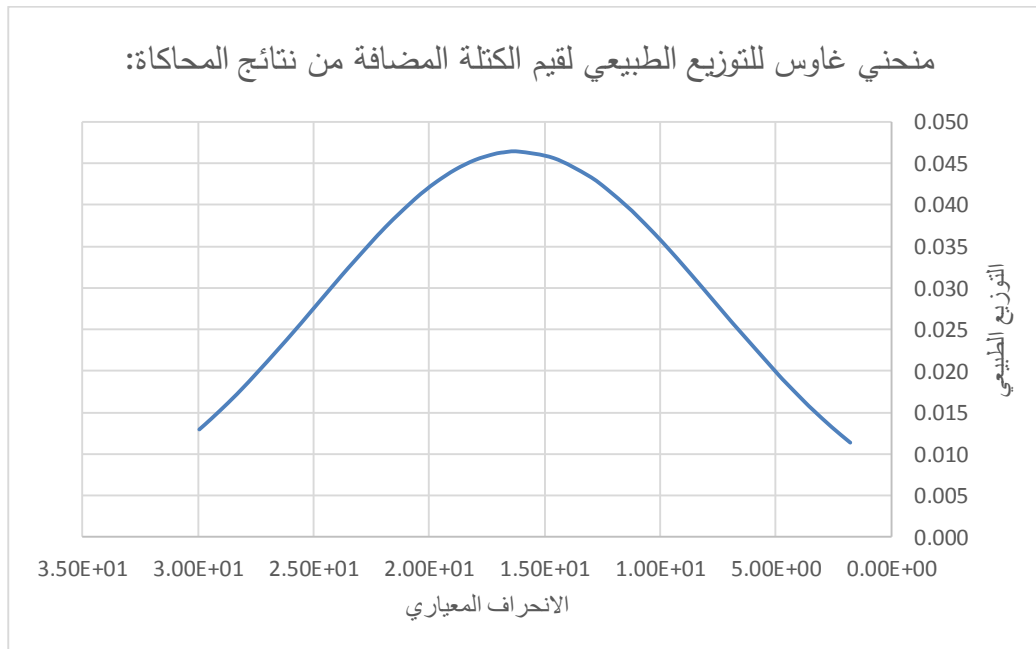
الزمن (دقيقة)	cov_inter	الزمن (دقيقة)	cov_inter
0.5	0.741	10.5	0.392
1	0.737	11	0.373
1.5	0.739	11.5	0.371
2	0.703	12	0.354
2.5	0.697	12.5	0.347
3	0.669	13	0.355
3.5	0.619	13.5	0.358
4	0.627	14	0.359
4.5	0.586	14.5	0.33
5	0.582	15	0.313
5.5	0.573	15.5	0.305
6	0.557	16	0.31
6.5	0.508	16.5	0.312
7	0.505	17	0.316
7.5	0.483	17.5	0.303
8	0.463	18	0.297
8.5	0.442	18.5	0.289
9	0.411	19	0.309
9.5	0.396	19.5	0.303
10	0.409	20	0.296



الشكل 49 العلاقة بين الزمن ومعامل الاختلاف في كتلة التلبيس COV.

4-6 الخطوة الرابعة :

إنشاء منحني غاوس لنتائج المحاكاة :



الشكل 50 منحني الانحراف المعياري في نتائج الكتلة المضافة لنتائج المحاكاة.

جدول 22 العلاقة بين التوزيع الطبيعي والانحراف المعياري لنتائج المحاكاة:

time (min)	Simulation added mass(mg)	normal distance	time (min)	Simulation added mass(mg)	normal distance
0.5	1.775	0.015	10.5	17.18	0.05
1.0	2.577	0.017	11.0	18.01	0.04
1.5	3.378	0.020	11.5	18.85	0.04
2.0	3.756	0.021	12.0	19.64	0.04
2.5	4.619	0.024	12.5	20.15	0.04
3.0	4.847	0.025	13.0	20.60	0.04
3.5	6.863	0.032	13.5	21.54	0.03
4.0	7.006	0.032	14.0	22.10	0.03
4.5	7.928	0.035	14.5	22.33	0.03
5.0	8.295	0.036	15.0	23.49	0.03
5.5	8.958	0.038	15.5	23.95	0.02
6.0	9.559	0.040	16.0	24.29	0.02
6.5	10.228	0.042	16.5	24.78	0.02
7.0	11.033	0.044	17.0	25.11	0.02
7.5	11.398	0.045	17.5	26.14	0.02
8.0	12.299	0.046	18.0	27.80	0.01
8.5	13.111	0.047	18.5	28.57	0.01
9.0	14.602	0.048	19.0	28.78	0.01
9.5	16.132	0.047	19.5	29.41	0.01
10.0	16.768	0.046	20.0	29.93	0.01

RSD%	Std.s	Average
0.531237	8.603206	16.19465

نلاحظ أن قيمة الانحراف المعياري النسبي لنتائج المحاكاة (relative standard deviation) هي

0.53 % ؛ أي أقل من 6.25 % وهذه القيمة ضمن الحدود المسموح بها حيث إن RSD يجب ألا

تتجاوز 6.25 % حسب دستور الأدوية 2011 [7] [8] [10] [12].

5-6 الخطوة الخامسة:

إنشاء جدول ومنحنٍ بياني للاستقراء الرياضي للعلاقة بين الزمن ومعامل الاختلاف cov

(coefficient of variation) للكتلة المضافة عند زمن 80 دقيقة:

نظراً لتطابق وتقارب نتائج النمذجة مع النتائج الحقيقية والوقت المستهلك الكبير لنمذجة 20 دقيقة

بينما الوقت الكلي المطلوب هو 80 دقيقة لذا تم اعتماد إجراء استقراء رياضي لاستقراء قيمة cov عند

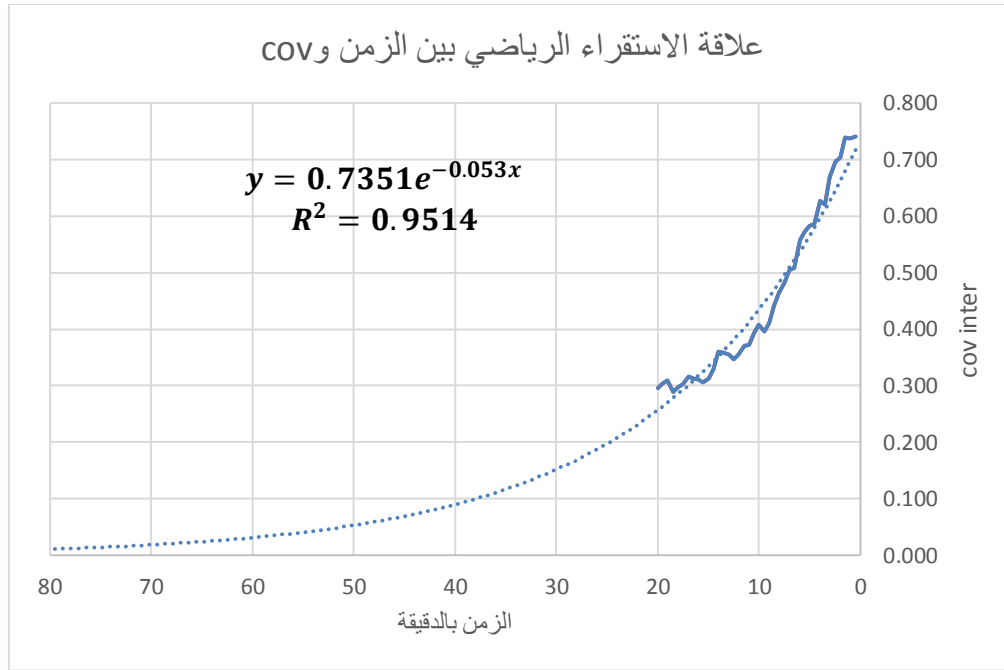
نهاية التلبيس؛ أي عند الزمن 80 دقيقة، وكان المنحني الممثل لها هو منحني لعلاقة أسية (العلاقة 22)

$$Y = 0.7351e^{-0.053x} \quad 23$$

$$R^2=0.9514$$

أما R^2 يسمى معامل الانحدار وهو قيمة بين الصفر والواحد وكلما كانت القيمة أقرب إلى (1)

دلالة على تشابه وتطابق المنحني المستنتج مع القيم المدخلة.



الشكل 51 المنحني البياني الأسّي المستنتج للاستقراء الرياضي للعلاقة بين الزمن و cov.

تم التعويض في المعادلة 22 لحساب cov عند القيم من 20.5 دقيقة وحتى 80 دقيقة؛ وذلك

للتوصل لقيمة معامل الاختلاف في كتلة التلبيس المضافة (cov) (coefficient of variation).

وهي كما في الجدول 22 تساوي 0.011 وهي أقل من القيمة الدستورية 0.0625

حيث (cov_inter)، يجب ألا يتجاوز 6.25٪ (أو 0.0625) حسب دستور الأدوية 2011 [8].

وقيمة أس التضاؤل الزمني (-0.05)

جدول 23 العلاقة بين الزمن بالدقيقة والاستقراء الرياضي لقيمة الانحراف المعياري COV:

time (min)	extrapolated cov	Time (min)	extrapolated cov	time (min)	extrapolated cov
20.5	0.248	30.5	0.146	40.5	0.086
21	0.242	31	0.142	41	0.084
21.5	0.235	31.5	0.138	41.5	0.081
22	0.229	32	0.135	42	0.079
22.5	0.223	32.5	0.131	42.5	0.077
23	0.217	33	0.128	43	0.075
23.5	0.212	33.5	0.125	43.5	0.073
24	0.206	34	0.121	44	0.071
24.5	0.201	34.5	0.118	44.5	0.070
25	0.195	35	0.115	45	0.068
25.5	0.190	35.5	0.112	45.5	0.066
26	0.185	36	0.109	46	0.064
26.5	0.180	36.5	0.106	46.5	0.063
27	0.176	37	0.103	47	0.061
27.5	0.171	37.5	0.101	47.5	0.059
28	0.167	38	0.098	48	0.058
28.5	0.162	38.5	0.096	48.5	0.056
29	0.158	39	0.093	49	0.055
29.5	0.154	39.5	0.091	49.5	0.053
30	0.150	40	0.088	50	0.052
time (min)	extrapolated cov	Time (min)	extrapolated cov	time (min)	extrapolated cov
50.5	0.051	60.5	0.030	70.5	0.018
51	0.049	61	0.029	71	0.017
51.5	0.048	61.5	0.028	71.5	0.017
52	0.047	62	0.027	72	0.016
52.5	0.045	62.5	0.027	72.5	0.016

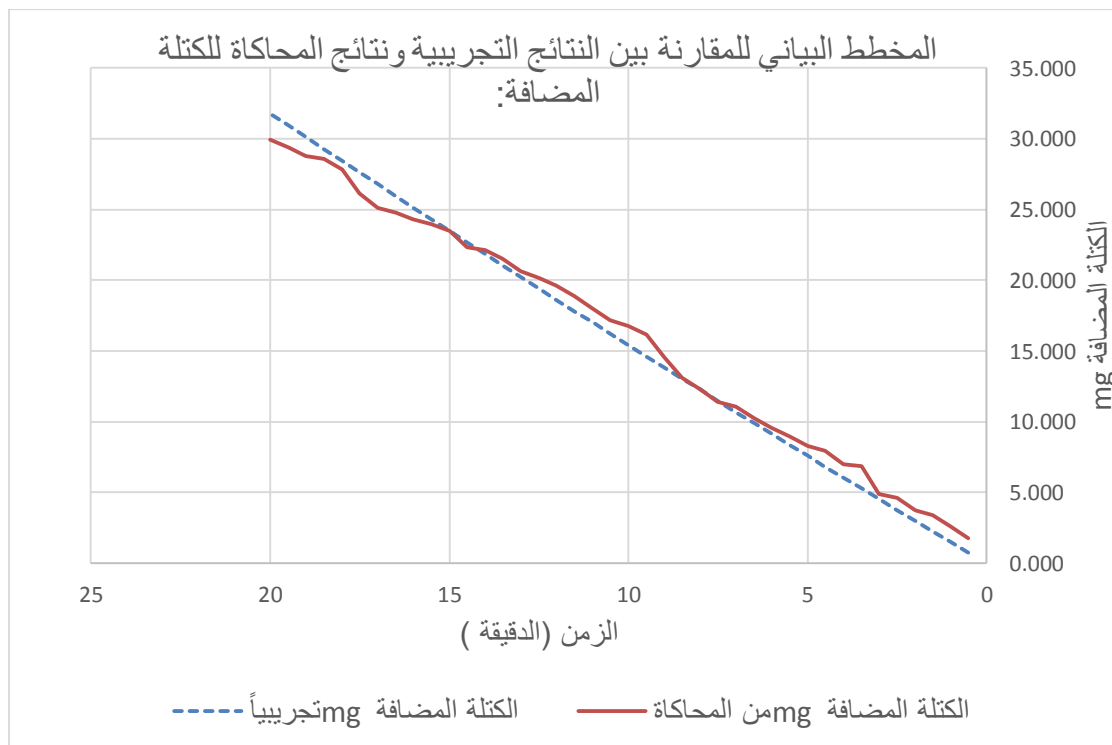
53	0.044	63	0.026	73	0.015
53.5	0.043	63.5	0.025	73.5	0.015
54	0.042	64	0.025	74	0.015
54.5	0.041	64.5	0.024	74.5	0.014
55	0.040	65	0.023	75	0.014
55.5	0.039	65.5	0.023	75.5	0.013
56	0.038	66	0.022	76	0.013
56.5	0.037	66.5	0.022	76.5	0.013
57	0.036	67	0.021	77	0.012
57.5	0.035	67.5	0.021	77.5	0.012
58	0.034	68	0.020	78	0.012
58.5	0.033	68.5	0.019	78.5	0.011
59	0.032	69	0.019	79	0.011
59.5	0.031	69.5	0.018	79.5	0.011
60	0.031	70	0.018	80	0.011

7- مقارنة بين نتائج المحاكاة والنتائج المخبرية:

جدول 24 مقارنة بين النتائج المخبرية ونتائج المحاكاة:

الزمن المستهلك دقيقة	مقدار الزيادة في الكتلة تجريبياً mg	مقدار الزيادة في الكتلة من المحاكاة mg	الزمن المستهلك دقيقة	مقدار الزيادة في الكتلة تجريبياً mg	مقدار الزيادة في الكتلة من المحاكاة mg
0.5	0.746	1.775	10.5	16.21	17.176
1	1.495	2.577	11	17	18.006
1.5	2.247	3.378	11.5	17.81	18.853
2	3.001	3.756	12	18.61	19.642
2.5	3.757	4.619	12.5	19.42	20.147
3	4.516	4.847	13	20.23	20.599

3.5	5.278	6.863	13.5	21.04	21.544
4	6.042	7.006	14	21.85	22.101
4.5	6.809	7.928	14.5	22.67	22.333
5	7.578	8.295	15	23.48	23.494
5.5	8.35	8.95752	15.5	24.306	23.947
6	9.124	9.5589	16	25.129	24.2892
6.5	9.901	10.22814	16.5	25.954	24.7806
7	10.681	11.0331	17	26.782	25.1082
7.5	11.463	11.39814	17.5	27.612	26.1378
8	12.247	12.29904	18	28.445	27.7992
8.5	13.034	13.11102	18.5	29.28	28.5714
9	13.823	14.6016	19	30.117	28.782
9.5	14.615	16.13196	19.5	30.956	29.4138
10	15.409	16.76844	20	31.798	29.9286



الشكل 52 مخطط المقارنة بين مقدار الزيادة في الكتلة تجريبياً ومقدار الزيادة في الكتلة من المحاكاة

8- الدراسة الإحصائية:

لاتخاذ قرار بمدى تقارب النتائج الحقيقية من نتائج النمذجة تم إجراء اختبار أن المجتمعين

(العينتين) متماثلتين، وهو:

(t-Test Paired Two Sample for Means) اختبار عينتين مرتبطتين للمتوسطات، وذلك كون

العينتين تتبعان للتوزيع الطبيعي، وهو اختبار فيما إذا كانت العينتان مأخوذتين من المجتمع نفسه بغض

النظر عن ذلك المجتمع، وهو يقوم بمقارنة متوسط العينة الأولى مع متوسط العينة الثانية .

وتكون فرضيات الدراسة :

α هي أعلى نسبة خطأ يسمح بها الباحث، تسمى مستوى الدلالة ، تساوي (0.05).

1- وضع الفرض الصفري: أي ليس هناك فرق معنوي إحصائي بين الكتل في الطريقتين

$$H_0 = \mu_1 - \mu_2 = 0$$

إذا كان $\text{sig} > \alpha$

2- الفرض البديل أي هناك فرق معنوي إحصائي بين الكتل في الطريقتين.

$$H_1 = \mu_1 - \mu_2 \neq 0$$

إذا كان $\text{sig} < \alpha$

حيث

sig معنوية الاختبار .

alpha مستوى الأهمية.

μ_1 متوسط الأوزان في الطريقة التجريبية

μ_2 متوسط الأوزان في طريقة المحاكاة.

وعند تطبيق الاختبار في برنامج الإكسل حصلنا على النتائج التالية في الجدول 26.

جدول 25 نتائج الاختبار الإحصائي (t-Test Paired Two Sample for Means) بواسطة برنامج الإكسل:

t-Test: Paired Two Sample for Means		
	Variable 1	Variable 2
Mean المتوسط	15.970	16.195
Variance الانحراف المعياري	86.697	74.015
Observations عدد العينات الإحصائية	40	40
Pearson Correlation نسبة الارتباط	0.998	
Hypothesized Mean Difference متوسط الفرق المفترض	0	
df	39	
t Stat	-1.507	
P(T<=t) one-tail	0.070	
t Critical one-tail	1.685	
P(T<=t) two-tail	0.140	
t Critical two-tail	2.03	

حيث نلاحظ من الجدول 26:

$\mu_1 = 15.9700125$	متوسط العينة الأولى
$\mu_2 = 16.19465$	متوسط العينة الثانية
$s_1 = 86.69744371$	انحراف العينة الأولى

انحراف العينة الثانية	$s_2 = 74.01516$
-----------------------	------------------

وتبين لدينا في ارتباط بيرسون وجود ارتباط قوي بنسبة 99.7% بين العينتين المدروستين .

وتبين أنه ليس هناك فرق معنوي إحصائياً بين متوسط الأوزان في الطريقة التجريبية ومتوسط

الأوزان في طريقة المحاكاة، وذلك بنسبة خطأ مقداره 0.05 (حيث إن معنوية الاختبار $\text{sig}=0.139$

أكبر من مستوى الأهمية $\alpha = 5\%$)،

وبناءً على ذلك، فإنه يمكننا القول: ليس هناك فروق بين العينتين والفرضية الصفرية صحيحة .

9- نتائج النمذجة

في بداية كل محاكاة، تم وضع المضغوطات في الحلة، والتي تم تدويرها في المرحلة الأولية لمدة

3 ثوانٍ حتى يصل سرير المضغوطات إلى حالة مستقرة. بعد ذلك ، بدأت المحاكاة الحقيقية عن طريق

تطبيق البخ.

9-1 تمثيل سرعة المضغوطات

تعزز الحواجز المدمجة في الحلة عملية الخلط المحوري والقطري، وتضمن عدم تشكيل مناطق

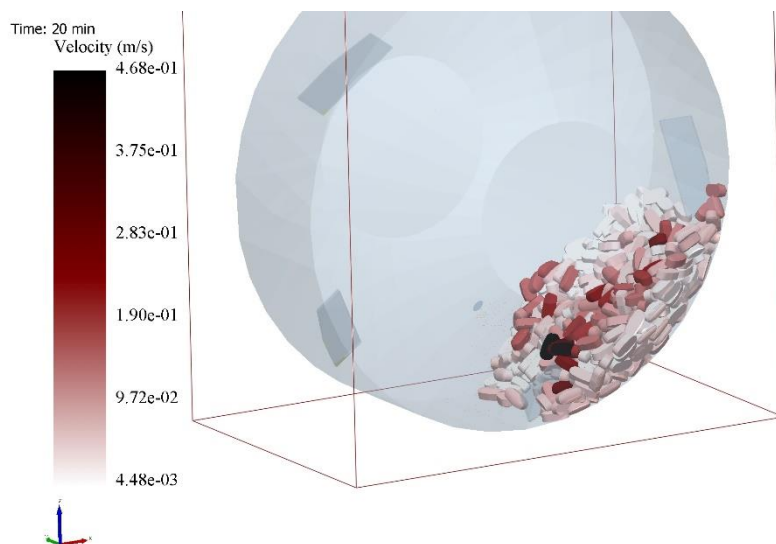
ميتة. حيث يحدث انتقال للمضغوطات لأعلى السرير، ومن ثم بعد الوصول إلى الجزء العلوي من سرير

المضغوطات، يحدث انزلاق للمضغوطات للأسفل، وتمر عبر منطقة البخ حيث يتم تطبيق كتلة

التلبيس[7].

في الشكل 52 تمثيل سُرْع المضغوطات باختلاف الألوان: حيث توجد المضغوطات الأسرع في

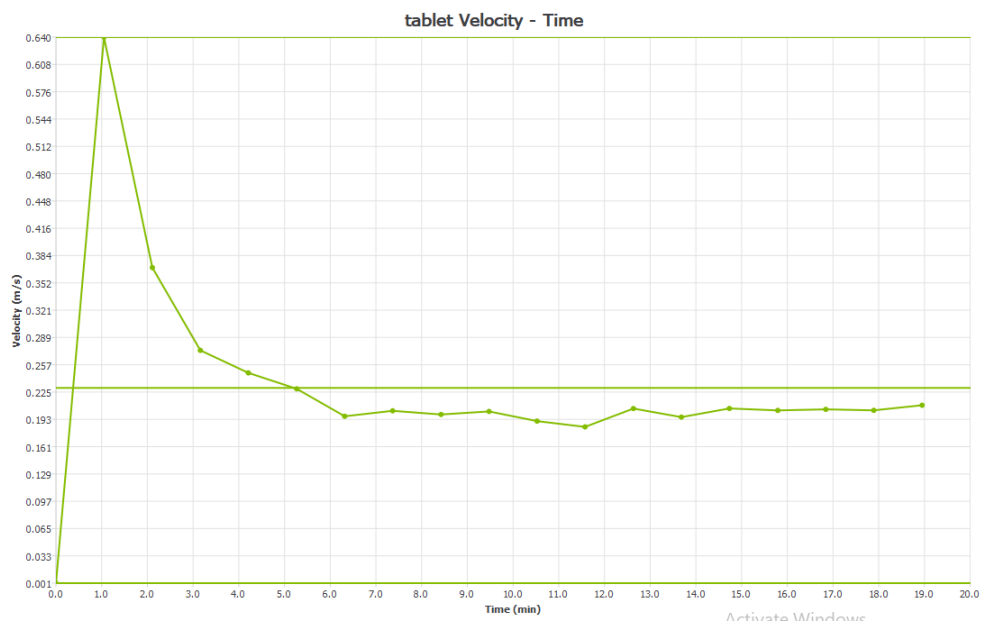
الجزء العلوي من سرير المضغوطات.



الشكل 53 السرعة الخطية للمضغوطات.

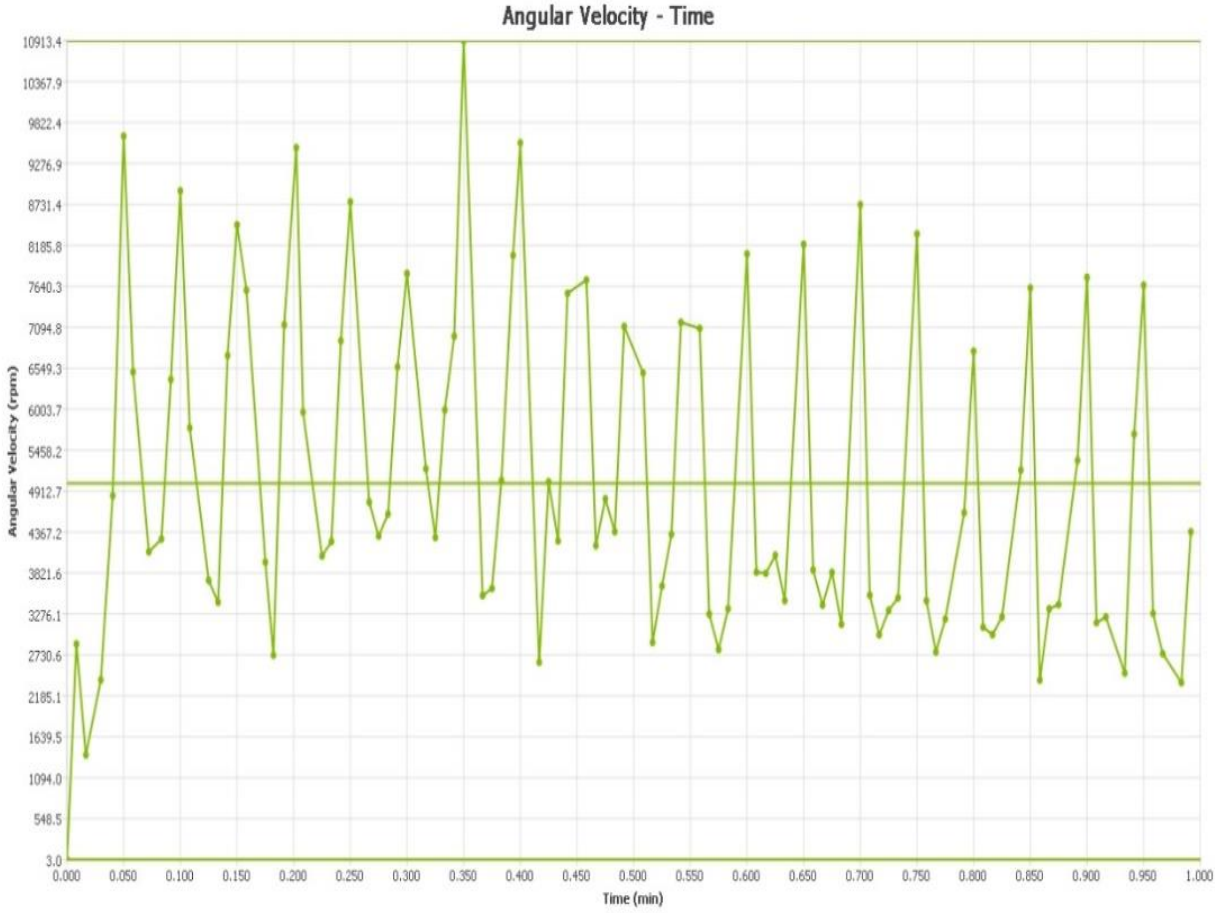
كما نلاحظ من المخطط (الشكل 53) استقرار السرعة الخطية للمضغوطات بسبب وجود

المجاذيف؛ وبالتالي حصول المضغوطات تقريباً على السرعة الخطية نفسها.



الشكل 54 العلاقة بين الزمن والسرعة الخطية للمضغوطات.

أما بالشكل 54 نلاحظ اختلاف السرعة الزاوية للمضغوطات ضمن المجال نفسه دلالة على التقلبية الجيدة .



الشكل 55 السرعة الزاوية للمضغوطات.

2-9 العلاقة بين زمن التلبيس ومعامل الاختلاف ومعامل الاختلاف cov

(coefficient of variation) للكتلة المضافة:

ورد في الدراسات المرجعية [7] [12] [10] أن معامل الاختلاف في كتلة التلبيس يتناقص مع مقلوب الجذر

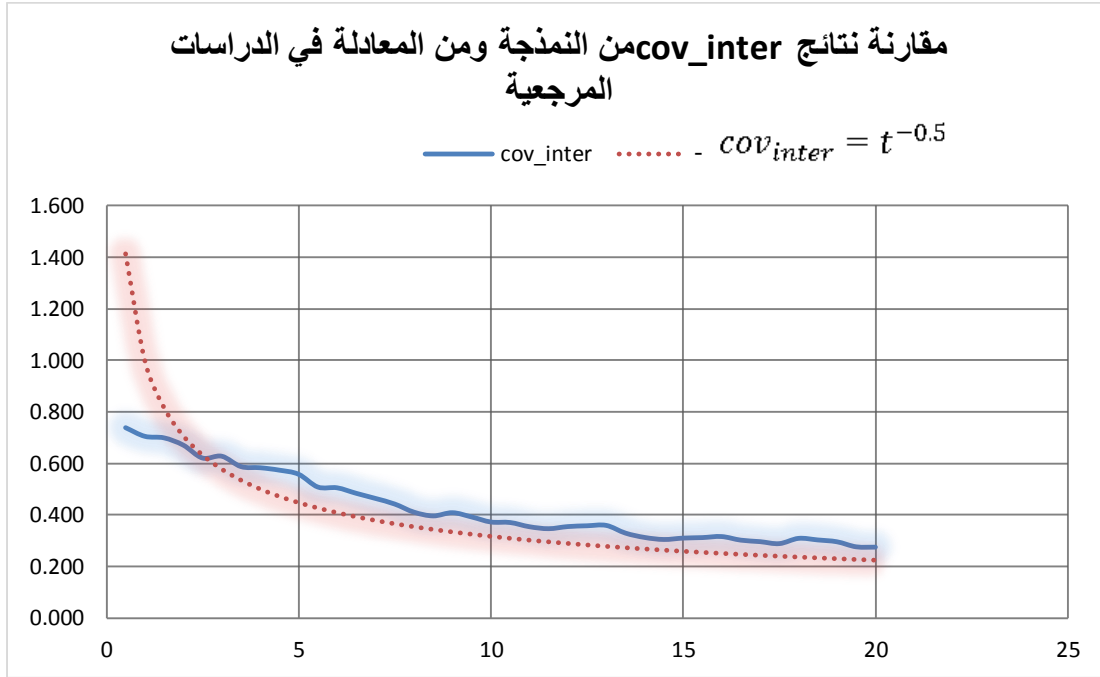
التربيعي لزمن التلبيس t:

$$\text{cov_inte} \propto \frac{1}{\sqrt{t}} = t^{-0.5} \quad (24)$$

من محاكاة DEM تم حساب معامل الاختلاف لكتلة التلبيس ومقارنته مع القيم الناتجة من تطبيق المعادلة 24.

من الشكل 55 يتبين أن الانحراف المعياري يتناقص مع ازدياد زمن التلبيس كما هو مذكور في المراجع

[7][12][10]



الشكل 56 مقارنة نتائج cov_inter من النمذجة ومن المعادلة في الدراسات المرجعية

جدول 26 مقارنة بين قيمة الانحراف النسبي الناتج من النمذجة ومن القانون 24 من الدراسات المرجعية

Time (min)	Cov_inter	$cov_inter = t^{-0.5}$	Time (min)	Cov_inter	$cov_inter = t^{-0.5}$
0.5	0.737	1.414	10.5	0.371	0.309
1	0.703	1.000	11	0.354	0.302
1.5	0.697	0.816	11.5	0.347	0.295
2	0.669	0.707	12	0.355	0.289
2.5	0.619	0.632	12.5	0.358	0.283
3	0.627	0.577	13	0.359	0.277
3.5	0.586	0.535	13.5	0.330	0.272
4	0.582	0.500	14	0.313	0.267

4.5	0.573	0.471	14.5	0.305	0.263
5	0.557	0.447	15	0.310	0.258
5.5	0.508	0.426	15.5	0.312	0.254
6	0.505	0.408	16	0.316	0.250
6.5	0.483	0.392	16.5	0.303	0.246
7	0.463	0.378	17	0.297	0.243
7.5	0.442	0.365	17.5	0.289	0.239
8	0.411	0.354	18	0.309	0.236
8.5	0.396	0.343	18.5	0.303	0.232
9	0.409	0.333	19	0.296	0.229
9.5	0.392	0.324	19.5	0.277	0.226
10	0.373	0.316	20	0.276	0.224

وتم حساب نسبة الانحراف% (نسبة الخطأ بين قيم النمذجة والقيم من تطبيق المعادلة 24) وحساب المتوسط الحسابي لها 0.62 %

الفصل الخامس

النتائج والمقارنة مع الدراسات

المرجعية والآفاق المستقبلية

نستعرض في هذا الفصل النتائج والمقارنة مع الدراسات المرجعية والآفاق المستقبلية

1- النتائج:

أثبتت الدراسة أنَّ المحاكاة بواسطة برنامج EDEM مفيدة لدراسة عملية التلبيس المخبري، بهدف تقليل عدد التجارب على النطاق الصناعي بحيث يمكن الحصول على رؤية واضحة وكاملة لتأثير أي تغيير في بارامترات العملية عن طريق برنامج EDEM وإمكانية الحصول على صور ومقاطع فيديو ومخططات بيانية وإجراء تحليل شامل للعملية، ويمكن دراسة تأثير بارامترات عملية التلبيس المختلفة على النتائج. ونتيجة لذلك، يمكن لبرنامج EDEM تحسين الفهم الميكانيكي لعملية تلبيس المضغوطات، وبالتالي تحسين العملية؛ أي يمكن أن تساعد الحسابات في تحديد أقصر وقت للعمليات، وتقليل عدد التجارب، وتقليل تكاليف تطوير العملية، وفشل العملية فشلاً ذريعاً، مما يؤدي إلى الحاجة إلى التخلص من الدفعة. يمكن أن يكون مفيداً إفادة خاصة على نطاق الإنتاج، حيث تحتوي دفعة واحدة غالباً على أكثر من مليون مضغوة.

يمكن تلخيص النقاط التي تم العمل عليها في هذا البحث بالآتي:

- ❖ رسم حلّة تلبيس مخبرية مشابهة لحلّة التلبيس المستخدمة ونمذجتها في أحد المعامل الدوائية.
- ❖ نمذجة الحلّة هندسياً وحركياً وتوضيح آلية عملها.
- ❖ رسم المضغوطات البيضاوية في الحلّة ونمذجتها.

- ❖ تطبيق جميع البارامترات الخاصة بالمستحضر، كما هو في برنامج النمذجة EDEM.
- ❖ إجراء المحاكاة الديناميكية لحركة حَلّة التلبيس والمضغوطات بواسطة برنامج EDEM.
- ❖ التأكد من صحة النتائج التجريبية مع نتائج النمذجة باستخدام الاختبارات الإحصائية المناسبة
- حيث تم إجراء اختبار (t-Test Paired Two Sample for Means) وهو اختبار عينتين مرتبطتين للمتوسطات وكانت نتيجة الاختبار وجود ارتباط بيرسون بنسبة كبيرة وهي 99.7 %
- وتبين أن الفرضية الصفرية صحيحة وليس هناك أي فرق إحصائي بين أوزان المضغوطات
- الملبسة في طريقة النمذجة والطريقة التجريبية المخبرية.
- ❖ تمثيل العلاقات الرياضية الخاصة بضبط جودة التباين في وزن المضغوطات الناتجة والتأكد من
- المطابقة بين النمذجة والتجريبية (المخبرية) حيث يجب أن يكون $cov_inter < 6.25\%$ حسب
- دستور الأدوية وكانت نتيجة النمذجة والنتيجة المخبرية مساوية لـ $cov_inter = 0.58\%$.
- ❖ دراسة تأثير وجود مجاذيف في حَلّة التلبيس في فعالية المزج والخلط الجيد للمضغوطات داخل
- الحَلّة

2- المقارنة مع الدراسات المرجعية :

- اتفقت النتائج التي تم الحصول عليها مع الدراسات المرجعية التالية :
- 1- الدراسات المرجعية [7] [10] [12] والتي توصلت إلى أن cov_inter الانحراف المعياري النسبي يتناقص مع ازدياد زمن التلبيس حتى يصل إلى وضع الاستقرار .

2- الدراسات المرجعية [7] [10] [12] والتي توصلت إلى أن cov_inter الانحراف المعياري النسبي يجب ألا يتجاوز القيمة الحدية لدستور الأدوية [8] وهي 6.25% .

3- الدراسات المرجعية [7][10][12] حيث تتناسب cov_inter مع مقلوب الجذر التربيعي لزمن التلبيس وتم حساب نسبة انحراف النتائج مع المعادلة المنصوص عليها في المراجع وكانت بنسبة انحراف 0.62%

اختلفت النتائج التي تم الحصول عليها مع الدراسات المرجعية التالية :

1- الدراسة المرجعية [7] وجدت أن علاقة الاستقراء الرياضي للتنبؤ بالعلاقة بين cov_inter عند انتهاء زمن النمذجة 300 دقيقة هي علاقة أسية ذات أس تضاهلي مساوٍ (-0.5) أما في دراستنا تم التنبؤ بقيمة cov_inter عند نهاية زمن النمذجة أي عند 80 دقيقة ووجدت أيضاً انها علاقة أسية ولكن ذات أس تضاهلي (-0.05) والسبب في ذلك يرجع إلى الفرق بين بارامترات العملية من تدفق سائل التلبيس وعدد فرود البخ وحجم التحضير .

3- الآفاق المستقبلية:

هذا البحث قابل للتطوير من نواحٍ عديدة نلخصها بالنقاط الآتية:

❖ يمكن نمذجة الحل الصناعية ذات حجم التحضيرات الأكبر مع وجود حاسوب ذي قدرة معالجة

أعلى (مثال: CORE I7-I9) وكرت شاشة ذي معالجة رسومية أعلى (GPU) (GTX1080 مثلاً).

❖ اقتران برنامج EDEM ببرنامج ANSYS عن طريق (EDEM – ANSYS COUPLING)

TOOL) لدراسة CFD تأثير الجريانات في الحل الصناعية من درجة حرارة وتدفق هواء الدخل

والخرج .

❖ يمكن إجراء OPTIMIZATION دراسة التصميم الأمثل عن طريق تغيير البارامترات؛

للحصول على أفضل جودة أداء، وأقصر وقت تلبيس كما في المراجع [21] [7] [12] [10] (سرعة

دوران حلّة التلبيس، وتدفق ودرجة حرارة هواء الدخول والخرج، وشكل المضغوطات، وكمية

المضغوطات، ومعدل التدفق، وعدد فرود البخ، وموقع فرود البخ وزاويتها، وتأثير نسبة الصلب

الموجودة في سائل التلبيس، وزمن العملية) وكل ذلك لتحقيق معامل تباين كتلة المضغوطات

الملبسة أقل من 6.25 % (أو 0.0625).

❖ دراسة تجانس سماكة طبقة التلبيس؛ أي معامل التباين في سماكة طبقة التلبيس للمضغوة

الواحدة، وذلك بدراسة (RESIDENCE TIME SPRAY ZONE)، حيث يقوم EDEM بدراسة

عدد مرات زيارة المضغوة لمنطقة البخ وزمن الإقامة لكل مضغوة، وفي كل مرة تدخل فيها

المضغوة يتم تلقي كمية من سائل التلبيس، ويتم الإضافة بشكل تراكمي حتى نهاية العملية .

❖ دراسة برامج أخرى خاصة بـ DEM مثل -THREE -ROCKY -LIGGGTS

PARTICLE ودراسة مجال الدقة فيما بين البرامج الهندسية.

4- توصيات البحث :

يمكن بعد التحقق من دقة برنامج EDEM استخدام هذا البرنامج لمعالجة ونمذجة المضغوطات

المراد تلبيسها ضمن أي معمل دوائي ودراسة تأثير الزمن في العملية الإنتاجية و حل المشاكل التي

تتعرض لها تلك المعامل كما يمكن التحقق من أثر بارامتر معدل تدفق فروود البخ أو زيادة عدد فروود

البخ على تقليل زمن العملية والحصول على السماكة والوزن المطلوبين .

كما يمكن دراسة مدى زيادة أو تخفيض عدد دورات حلة التلبيس الصناعية على تجانس سماكة طبقة

التلبيس .

ويمكن دراسة أثر تغير موقع وزاوية فروود البخ على الزمن والجودة .

قائمة الرموز المستخدمة في البحث :

الرمز	المسمى	الوحدة
F_{van}	قوة فاندر فال	[N]
A_H	معامل هامكر	[J]
d	المسافة الفاصلة بين الجسيمين	[m]
R	نصف قطر الجسيمين	[m]
FLB	قوة الجسر السائلة	[N]
γ	هو التوتر السطحي للسائل	[N/m]
$\vec{F}_{12}$	هي القوة المتبادلة بين الشحنتين	[N]
q_1	قيمة الشحنة الأولى واحدها كولوم	[C]
q_2	قيمة الشحنة الثانية واحدها كولوم	[C]
r_{12}^2	مربع المسافة بين مركزي الشحنتين	[m ²]
K_e	ثابت كولوم	[Nm ² /c ²]
T_R	خطوة زمن رايلي	[s]
R	قطر الجزيئات	[m]
ρ	الكثافة	[kg/m ³]
G	معامل القص	[N/m ²]
ν	معامل بواسون للجزيئات	–
F_D	قوة السحب (Drag force)	[N]
a	تسارع الجسيم	[m/s ²]
ρ_p	كثافة الجسيم	[kg/m ³]
ρ_f	كثافة السائل	[kg/m ³]
C_D	معامل السحب	–

قائمة المراجع

1. Favier, John. "Industrial Application of DEM: Capabilities and Challenges." Edem simulation, 2010, www.edemsimulation.com/.
2. Börner, M. (2011). Discrete element method | Computational Fluid Dynamics | Force. [online] Scribd. Available at: <https://www.scribd.com/document/376509070/Discrete-element-method> [Accessed 16 Apr. 2018].
3. WHAT IS DEM Theoretical background behind the Discrete Element Method(DEM). (n.d.). Retrieved from <https://www.edemsimulation.com/what-is-dem-ebook-download>.
4. Martín, M. (2015). Introduction to software for chemical engineers. New York, pp.249–252.
5. Martín, M. (2015). Introduction to software for chemical engineers. New York, pp.258–259.
6. Pandey, P., Bindra, D.S., & Felton, L.A. (2013). *Influence of Process Parameters on Tablet Bed Microenvironmental Factors During Pan Coating*. *AAPS PharmSciTech*, 15, 296–305.
7. Boehling, P., Toschkoff, G., Knop, K., Kleinebudde, P., Just, S., Funke, A., Rehbaum, H. and Khinast, J., 2016. Analysis of large-scale tablet coating: Modeling, simulation and experiments. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, 90, pp.14–24.
8. Pharmacopoeia, E., 2011. Technical Guide.
9. How to prevent tablet coating problems. PharmTech. (n.d.). Retrieved November 28, 2021, from <https://www.pharmtech.com/view/how-prevent-tablet-coating-problems>.

10. Zhang, Q., Wan, H., Jian, B., & Hu, G. (2018). Comparisons of Inter-tablet Coating Variability under Different Tablet Shapes and Filling Levels by Using DEM Simulations. MATEC Web of Conferences, 238, 04008. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823804008>
11. Elert, G. (n.d.). Density of Steel. Density of Steel – The Physics Factbook. Retrieved November 29, 2021, from <https://hypertextbook.com/facts/2004/KarenSutherland.shtml>.
12. Toschkoff, G., Just, S., Knop, K., Kleinebudde, P., Funke, A., Djuric, D., Scharrer, G. and Khinast, J., 2015. Modeling of an Active Tablet Coating Process. Journal of Pharmaceutical Sciences, 104(12), pp.4082–4092
13. Munjiza, Ante (2004). The Combined Finite–Discrete Element Method. Chichester: Wiley. ISBN 978–0–470–84199–0
14. A. Grima et.al., “Predicting bulk flow and behaviour for design and operation of handling and processing plants,” in 11th International Congress on Bulk Materials Storage, Handling and Transportation, Newcastle, Australia, 2013, pp. 1–10. [Online]. Available: <http://ro.uow.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?article=2677&context=eispapers>
15. A. Hassanpour and M. Pasha, “Discrete element method applications in process engineering,” in Introduction to Software for Chemical Engineers, M. M. Martin, Ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2015.
16. Govender, N.; Wilke, D. N.; Kok, S. (2016). "Blaze–DEMGPU: Modular high performance DEM framework for the GPU architecture". SoftwareX. 5: 62–66.
17. M. Kremmer, “A discrete element method for industrial granular flow applications,” Ph.D. dissertation, Dept. Agricultural & Environmental Science, Newcastle Univ., Newcastle upon Tyne, UK, 2001

18. P. A. Cundall and O. D. L. Strack, "A discrete numerical model for granular assemblies," *Géotechnique*, vol. 29, no. 1, pp. 47–65, 1979.
[Online]. Available:
<http://www.icevirtuallibrary.com/doi/abs/10.1680/geot.1979.29.1.47>
19. Rosato, Anthony D. "Lecture 2 Fundamentals of Discrete Element Modeling." *Fernandofraternali research*, 2010,
www.fernandofraternali research.com/presentazioni/lecture2_DEM.ppt.
20. Xu, J.; Qi, H.; Fang, X.; Lu, L.; Ge, W.; Wang, X.; Xu, M.; Chen, F.; He, X.; Li, J. (2011). "Quasi-real-time simulation of rotating drum using discrete element method with parallel GPU computing". *Particuology*. 9 (4): 446–450. doi:10.1016/j.partic.2011.01.003
21. Toschkoff, G., Just, S., Funke, A., Djuric, D., Knop, K., Kleinebudde, P., Scharrer, G., & Khinast, J. G. (2013). Spray models for discrete element simulations of particle coating processes. *Chemical Engineering Science*, 101, 603–614
22. أتمتة - automation. المعرفة. (n.d.). Retrieved February 7, 2022, from <https://www.marefa.org/%D8%A3%D8%AA%D9%85%D8%AA%D8%A9/simplified>
23. محاكاة. المعرفة. (n.d.). Retrieved February 7, 2022, from <https://www.marefa.org/%D9%85%D8%AD%D8%A7%D9%83%D8%A7%D8%A9>

Ministry of Higher Education

Damascus University

Faculty of Mechanical and electrical engineering

Department: Mechanical design engineering



A dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for
the Master Degree in production Automation Engineering

Modeling of tablets coating process using DEM

(Discrete Element Method)

By:

Shorouk Ahmad Sadaldeen

Supervisor:

PhD.Mhd Bassam Abouharb

(2021)

ABSTRACT

A simulation was carried out to model the pharmaceutical tablet coating process using a modeling and simulation program based on the Discrete Element Method (DEM) by applying the parameters of the research and development laboratory of one of the factories, which specialized in the pharmaceutical industries. DEM simulation was performed with EDEM 2021 software package (DEM Solutions Ltd., Edinburgh, UK).

The effect of the main parameters on the pharmaceutical tablet coating process was studied, which are: the geometry of the tablets, the geometry of the coating pan, the speed of rotation of the coating pan, the load of the coating pan, the position and angle of the spray guns, the physical properties of the spray droplets, the density of the coating solution, the density of the tablets, the flow of the used coating, the percentage of solids present in the coating liquid, the effect of paddles in the coating drum to achieve homogeneity in the movement and ensure that no dead points occur, the time of the coating process, the static and rolling friction coefficients between the tablets, droplets and the metal body of the drum Etc. Finally, it was verified that: The results by conducting a statistical study to ensure that the experimental results in the laboratory match the computer results from the simulation program.

Keyword: Discrete Element Method (DEM), simulation, Modeling.